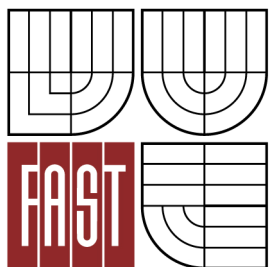




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

VLIV VOLBY VSTUPNÍCH PARAMETRŮ ZAŘÍZENÍ BLOWERDOOR TESTU NA VÝSLEDNOU HODNOTU PRŮVZDUŠNOSTI

INFLUENCE OF CHOICE OF INPUT PARAMETERS BLOWERDOOR TEST
EQUIPMENT ON THE FINAL VALUE OF AIR PERMEABILITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

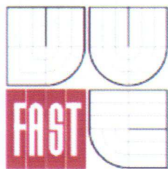
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ADAM KERMES

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DAVID BEČKOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program

N3607 Stavební inženýrství

Typ studijního programu

Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia

Studijní obor

3608T001 Pozemní stavby

Pracoviště

Ústav pozemního stavitelství

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant

Bc. Adam Kermes

Název

Vliv volby vstupních parametrů zařízení
Blowerdoor testu na výslednou hodnotu
průvzdušnosti

Vedoucí diplomové práce

Ing. David Bečkovský, Ph.D.

**Datum zadání
diplomové práce**

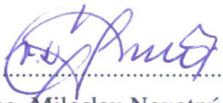
31. 3. 2012

**Datum odevzdání
diplomové práce**

11. 1. 2013

V Brně dne 31. 3. 2012




.....
doc. Ing. Milošlav Novotný, CSc.
Vedoucí ústavu


.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Katalogy a odborná literatura, Stavební zákon č.183/2006 Sb., Vyhláška č.499/2006 Sb., Vyhláška 268/2009 Sb., Vyhláška 398/2009 Sb., platné ČSN, příp. další podklady.....

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Zadání VŠKP: Analýza vlivu volby vstupních parametrů měření na výslednou hodnotu neprůvzdušnosti obálky budovy.

Cíl práce: Publikování výsledků z měření BlowerDoor při různých vstupních parametrech měření. Stanovení závislosti volby okrajových hodnot na výslednou hodnotu průvzdušnosti n50. Textová i výkresová část bude zpracována s využitím výpočetní techniky (v textovém a grafickém editoru). Výkresy budou opatřeny jednotným popisovým polem a k obhajobě budou předloženy složené do desek z tvrdého papíru potažených černým plátnem s předepsaným popisem se zlatým písmem.

Požadované výstupy dle uvedené Směrnice:

Textová část VŠKP bude obsahovat kromě ostatních položek také položku h) Úvod (popis námětu na zadání VŠKP), položku i) Vlastní text práce a položku j) Závěr (zhodnocení obsahu VŠKP, soulad se zadáním, změny oproti původní studii).

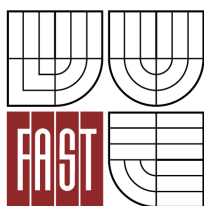
Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



.....
Ing. David Bečkovský, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Vedoucí práce	Ing. David Bečkovský, Ph.D.
Autor práce	Bc. ADAM KERMES
Škola	Vysoké učení technické v Brně
Fakulta	Stavební
Ústav	Ústav pozemního stavitelství
Studijní obor	3608T001 Pozemní stavby
Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Název práce	Vliv volby vstupních parametrů zařízení Blowerdoor testu na výslednou hodnotu průvzdušnosti
Název práce v anglickém jazyce	Influence of choice of input parameters blowerdoor test equipment on the final value of air permeability
Typ práce	Diplomová práce
Přidělovaný titul	Ing.
Jazyk práce	Čeština
Datový formát elektronické verze	PDF
Anotace práce	Diplomová práce se zabývá vlivem volby vstupních parametrů zařízení Blowerdoor testu na výslednou hodnotu průvzdušnosti. Měření bylo prováděno na souboru 4 experimentálních budov a jedné místnosti.
Anotace práce v anglickém jazyce	The thesis examines the influence of choice of input parameters Blowerdoor test equipment on the final value of air permeability. Measurements have been performed on a set of four experimental buildings and one room.
Klíčová slova	Vzduchotěsnost, průvzdušnost, obálka budovy, průtok vzduchu, intenzita výměny vzduchu n_{50} , Blower door test
Klíčová slova v anglickém jazyce	Air tightness, air permeability, envelope of building, air flow, Air Change rate n_{50} , Blower door test

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10.1.2013

.....
podpis autora
Bc. ADAM KERMES

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlivem volby vstupních parametrů zařízení Blowerdoor testu na výslednou hodnotu průvzdušnosti. Měření bylo prováděno na souboru 4 experimentálních budov a jedné místnosti.

Klíčová slova

Vzduchotěsnost, průvzdušnost, obálka budovy, průtok vzduchu, intenzita výměny vzduchu n_{50} , Blower door test

Abstract

The thesis examines the influence of choice of input parameters Blowerdoor test equipment on the final value of air permeability. Measurements have been performed on a set of four experimental buildings and one room.

Key words

Air tightness, air permeability, envelope of building, air flow, Air Change rate n_{50} , Blower door test

Bibliografická citace VŠKP

KERMES, Adam. *Vliv volby vstupních parametrů zařízení Blowerdoor testu na výslednou hodnotu průvzdušnosti*. Brno, 2012. 75 s., 91 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce Ing. David Bečkovský, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité zdroje.

V Brně dne 10.1.2013

.....
podpis autora
Bc. ADAM KERMES

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Davidu Bečkovskému Ph.D. za odborné rady, cenné připomínky a především čas a ochotu při vedení mé diplomové práce.

Dále děkuji panu Mgr. Stanislavu Palečkovi z firmy Radion za možnost zúčastnit se jím prováděných měření a za zkušenosti získané při těchto příležitostech.

Děkuji také svým rodičům, díky nimž mi bylo umožněno studium na vysoké škole a napsání této závěrečné diplomové práce.

Poděkování patří také dalším nejmenovaným osobám za poskytnutí objektů k měření.

V Brně dne 10.1.2013

OBSAH

1. ÚVOD.....	10
2. VZDUCHOTĚSNOST	11
2.1 Vzduchotěsnost objektů z fyzikálního hlediska.....	11
2.1.1 Tlakový rozdíl.....	11
2.1.2 Výměna vzduchu v budově	13
2.1.3 Vzduchotěsnost budov	17
3. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	25
3.1 Stanovení cílů	25
3.2 Důvod k volbě těchto cílů	25
3.3 Prostředky ke splnění cílů.....	25
3.3.1 Přístrojové vybavení	25
3.3.2 Experimentální objekty.....	26
4. METODY ZPRACOVÁNÍ	27
4.1 Měření vzduchotěsnosti	27
4.1.1 Metodika provádění blowerdoor testu	27
4.1.2 Zvolené postupy	30
4.2 Experimentální objekty a prostory	33
4.2.1 Experimentální objekt č.1: učebna D205 v prostorách VUT-FAST	34
4.2.2 Experimentální objekt č.2: Rodinný dům U hájenky, Moravské Knínice.....	34
4.2.3 Experimentální objekt č.3: Řadový rodinný dům, Veselská 1, Popůvky	36
4.2.4 Experimentální objekt č.4: Experimentální objekt VUT, Kulkova 10, Brno	37
5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ	39
5.1 Experimentální objekt č.1: učebna D205 v prostorách VUT-FAST.....	39
5.1.1 Průběh testu a vyhodnocení.....	39
5.1.2 Vyhodnocení měření	40
5.2 Experimentální objekt č.2: Rodinný dům U hájenky, Moravské Knínice	47
5.2.1 Průběh testu	47
5.2.2 Vyhodnocení měření	48
5.3 Experimentální objekt č.3: Řadový rodinný dům, Veselská 1, Popůvky	54
5.3.1 Průběh testu	54
5.3.2 Vyhodnocení měření	55
5.3.3 Shrnutí	62
5.4 Experimentální objekt č.4: Experimentální objekt VUT, Kulkova 10, Brno	62
5.4.1 Průběh testu	62
5.4.2 Vyhodnocení měření	64
5.4.3 Shrnutí	71
6. ZÁVĚRY	72
7. SEZNAM ZDROJŮ.....	74
8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	75
9. SEZNAM PŘÍLOH.	76

1. ÚVOD

Požadavky na snižování energetické náročnosti budov se neustále zvyšují. S rostoucími nároky na energetickou efektivitu ve všech stádiích stavební výroby a v průběhu následného užívání staveb, roste i snaha o dosažení vysoké kvality všech stavebních výrobků. Trendem je dosahování co nejnižšího součinitele prostupu tepla konstrukcí tvořících obálku budovy, při zachování přiměřené tloušťky spolu s dalšími požadovanými vlastnostmi jako je například propustnost slunečního záření u výplní otvorů nebo schopnost tepelného izolantu propouštět vzdušnou vlhkost a další. Důležitá je také orientace objektu, zasklených ploch a dispoziční řešení vzhledem ke světovým stranám.

Se zvyšujícím se počtem takto nově budovaných nízkoenergetických a pasivních domů vzniká předpoklad snižování energetické náročnosti na vytápění.

Aby bylo dosaženo co nejúčinnějšího vytápění obytných prostor, je nutné zajistit kontrolovatelnou výměnu vzduchu. Pokud je objekt opatřen dostatečnou tepelnou izolací, bývá právě nekontrolovatelné proudění vzduchu netěsnostmi zdrojem vysokých ztrát tepla. Snižování právě těchto ztrát na minimum dosáhneme co nejkvalitnějším utěsněním všech konstrukcí tvořících obálku budovy. Z toho vyplývá jeden z hlavních požadavků na budovy s nízkou energetickou náročností a tím je vzduchotěsnost.

V nadcházejících letech budou nároky na dosažení vysoké těsnosti staveb narůstat, proto je nutné věnovat zvýšenou pozornost nejen kvalitnímu provádění staveb, ale také kontrole hotových budov.

Ke kontrole a měření vzduchotěsnosti se již několik let používají jednotné metody dané legislativními předpisy. V těchto předpisech jsou stanoveny relativně přísné požadavky, jejichž splnění je náročné, jak technologicky, tak finančně.

Tématem diplomové práce je vliv volby vstupních parametrů na výslednou hodnotu průvzdušnosti, kde bylo posuzováno, do jaké míry ovlivňují různé vstupní parametry výsledné hodnoty průvzdušnosti obálky budovy.

2. VZDUCHOTĚSNOST

Vzduchotěsnost budovy vyjadřuje její schopnost propouštět vzduch prouděním netěsnostmi v obvodovém plášti. Pro stanovení vzduchotěsnosti stavebního objektu je nutné znát určité fyzikální zákonitosti týkající se právě této problematiky.

2.1 Vzduchotěsnost objektů z fyzikálního hlediska

2.1.1 Tlakový rozdíl

Podmínkou proudění vzduchu přes netěsnosti konstrukce z vnitřního do vnějšího prostředí a naopak je přítomnost rozdílu tlaku vzduchu v oddělovaných prostředích. Tlakový rozdíl je v běžných podmínkách ovlivněn kombinací účinků větru, teplotního rozdílu, vzduchotěsnosti obálky budovy, vzduchotěsnosti a uspořádání vnitřních konstrukcí budovy a případně účinkem mechanického větracího zařízení.

Čím větší je tlakový rozdíl oddělených prostředí tím více vzduchu může netěsnostmi protékat. Pro vyjádření průtoku vzduchu stavební konstrukcí, jednotlivými díly a spoji konstrukcí se používá empirická rovnice proudění (dle ČSN EN 13829 - 2001).

$$\tilde{V}_{env} = C_{env} \cdot (\Delta p)^n \quad [1]$$

Kde \tilde{V}_{env} je průtok vzduchu obálkou budovy v $m^3 \cdot h^{-1}$

C_{env} koeficient proudění vzduchu neboli součinitel proudění v $m^3 \cdot h^{-1} \cdot Pa^{-n}$

Δp je vyvolaný tlakový rozdíl v Pa

n bezrozměrný exponent proudění

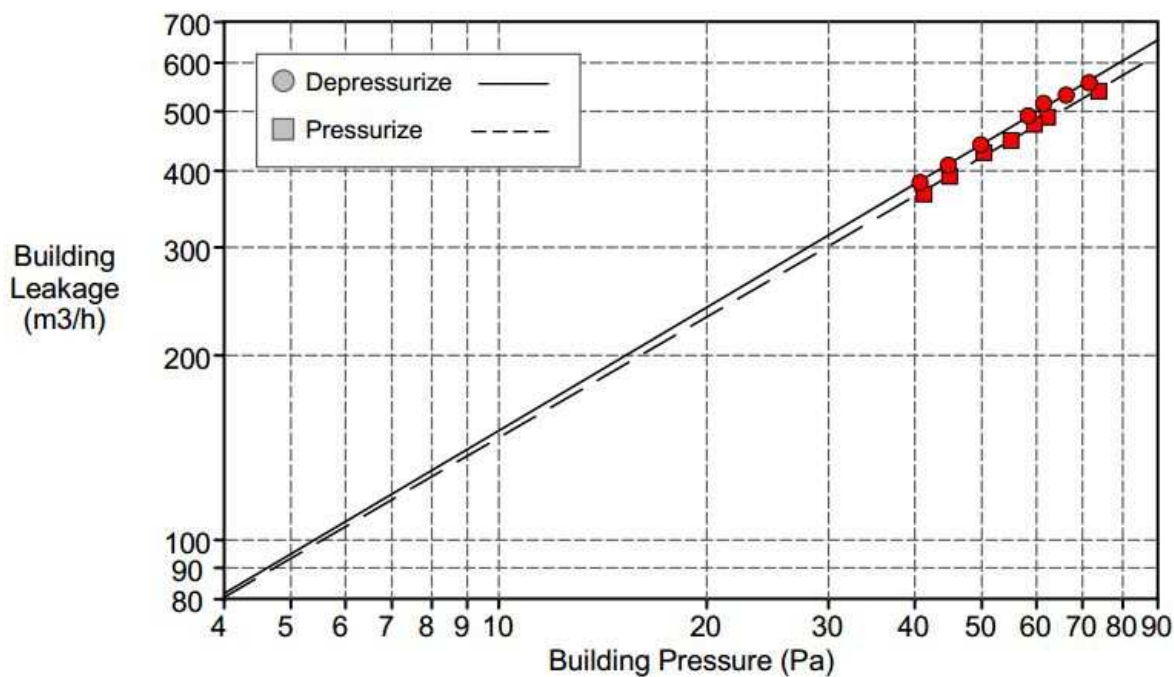
Parametry C a n z výše popsaného vztahu přímo popisují vzduchotěsnost posuzovaného prvku. Tyto parametry se získávají na základě experimentálního měření. Součinitel

C odpovídá průtoku vzduchu při tlakovém rozdílu 1 Pa. Exponent proudění n popisuje charakter proudění. Hodnota exponentu n leží v intervalu 0,5 – 1,0. Hodnoty bližší k 0,5 odpovídají turbulentnímu proudění např. v případě velkého množství malých netěsností, se kterými se můžeme setkat v ploše netěsných OSB desek. Hodnoty blíží se k 1,0 odpovídají laminárnímu proudění, tzn. menší množství relativně velkých netěsností projevujících se v důsledku perforace parozábrany, nedokonalého utěsnění prostupů tzb či napojení

navazujících konstrukcí. V případě nedostatečného množství informací o posuzovaném prvku se používá hodnota exponentu $n=0,67$.

Grafické znázornění:

Grafické zobrazení závislosti objemového toku vzduchu a tlakového rozdílu se vynáší do grafu v logaritmickém měřítku.



Obr. 1 Graf závislosti objemového toku vzduchu na tlakovém rozdílu,
[archív autora diplomové práce]

Tlakový rozdíl vlivem teplot

Rozdílný tlak vzduchu v interiéru a exteriéru souvisí s hustotou vzduchu. Hustota vzduchu závisí na teplotě, vlhkosti a atmosférickém tlaku. Vliv vlhkosti a atmosférického tlaku je zanedbatelný. Rozdíl atmosférického tlaku uvnitř a vně budovy je zpravidla nulový.

Tlakový rozdíl tedy závisí na rozdílu teplot a dále na výšce budovy, neboli na výšce místa kde tlakový rozdíl zjišťujeme.

Teplý vzduch s nižší hustotou než má vzduch chladný, stoupá vzhůru, proto vzniká v zimních měsících, kdy je vnější vzduch chladnější než vnitřní, v nižších částech budovy podtlak a ve vyšších, přetlak. Mezi těmito dvěma tlakovými rozdíly existuje oblast s nulovým rozdílem

tlaku, tzv. neutrální rovina. Poloha neutrální roviny závisí na netěsnostech rozložených po výšce budovy, není tedy pravidlem, že by tato rovina měla ležet uprostřed výšky objektu.

Pokud má budova všechny místnosti vzájemně propojené a pokud se předpokládaná teplota po výšce budovy nemění, je možné budovu považovat za jednu tlakovou zónu se zanedbatelnými tlakovými rozdíly. Pokud je budova rozdělena na několik tlakových zón je nutné počítat se vzduchotěsností dělících konstrukcí.

Tlakový rozdíl vlivem větru

U jednoduchých deskových těles dochází na návětrné straně k tlakovému působení větru a na straně závětrné k podtlaku tzv. sání větru. V reálu je obtékání budov větrem složitější. Velký význam má z tohoto hlediska tvar objektu a směr proudění vzduchu respektive osazení budovy v terénu. Tlakový rozdíl účinkem větru ovlivňují také překážky v okolí objektu, konfigurace terénu, zeleň atd. Velikost tlakových účinků závisí na síle a směru větru a na čase.

Tlakový rozdíl větracím zařízením

Tlakový rozdíl může být ovlivněn činností mechanického větracího zařízení. U rovnotlakých systémů je tento vliv zanedbatelný ve srovnání s tlakovými rozdíly větru nebo teploty.

U přetlakových nebo podtlakových systémů může být vliv větracího zařízení na tlak vzduchu výraznější.

Mezi tato zařízení patří například digestoře, spalovací spotřebiče, zařízení na výměnu vzduchu se zpětným získáváním tepla, atp.

Kombinace všech výše popsaných tlakových účinků působí na objekt a jeho vnitřní prostory neustále. Výsledné působení vnějších i vnitřních vlivů se však neustále mění v závislosti na povětrnostních podmínkách a provozu v budově. Tlakový rozdíl vlivem teploty a větru vstupuje přímo do výpočtů vzduchotěsnosti obálky budovy.

2.1.2 Výměna vzduchu v budově

Výměna vzduchu v budově významně ovlivňuje kvalitu vnitřního prostředí. Větrání má významný vliv na tepelné a vlhkostní chování budovy. Z hygienických důvodů je výměna vzduchu nezbytná, avšak z hlediska tepelných ztrát je snahou tuto výměnu omezit na minimum. Řešením je využití různých systémů pro řízenou výměnu vzduchu. Je třeba

soustředit pozornost na nalezení optimálního stavu, který bude splňovat jak náročné tepelné technické požadavky tak požadavky hygienické.

Aby mohla být výměna vzduchu v budově co nejúčinnější, musí být důsledně vyřešena vzduchotěsnost obálky budovy.

Účelem výměny vzduchu v budově je hlavně větrání, které má zajistit dostatečnou kvalitu vzduchu. Dostatečné kvalitní vzduch zajistíme přísunem vzduchu s dostatečným množstvím kyslíku a zároveň odvodem vzduchu s vysokou vlhkostí a koncentrací škodlivin uvolňovaných provozem v budově.

Pro zajištění dostatečného množství kyslíku stačí přísun velmi malého množství vzduchu cca 1 l/s.os. Vždy však záleží na konkrétní situaci, na účelu prostoru a činnosti člověka. Indikátorem nutnosti výměny vzduchu v prostoru je nejčastěji používána koncentrace CO₂. Aby bylo možné udržet koncentraci CO₂ v přípustných mezích, je nutné odvádět větší množství vzduchu, než je minimální množství vzduchu přiváděného. [3]

Dle české legislativy je požadováno, aby intenzita větrání byla minimálně 0,5 násobkem objemu vzduchu větraného pobytového prostoru. Druhou možností je dodržení minimální požadované dávky čerstvého vzduchu 25 m³.h⁻¹ na osobu, kterou je dále možné snížit předpokládanou dobou přítomnosti. Přítomnost osob v obytných místnostech rodinného domu či bytu se obvykle uvažuje hodnotou 0,7.

Takto vypočtená hodnota požadované výměny vzduchu je z ekonomického hlediska daleko příznivější než 0,5 násobná výměna veškerého vzduchu v objektu. Proto je nutné při výpočtech energetické náročnosti budov věnovat výměně vzduchu pozornost a zahrnout zde všechny ovlivňující parametry jako je počet osob, účel prostoru a podobně. [4]

Škodliviny

Škodliviny obsažené ve vnitřním vzduchu (vznikající ve vnitřním prostředí) jsou ředěny se vzduchem přiváděným z vnějšího prostředí. Vzduch přiváděný do místnosti by měl mít menší množství škodlivin než vnitřní. Množství přiváděného vzduchu by se mělo rovnat množství vzduchu odváděného. Potřebné množství přiváděného a odváděného vzduchu je závislé na provozu v budově a na zdrojích škodlivin.

Způsoby výměny vzduchu v budově

Výměnou vzduchu v budově se rozumí veškerý tok vzduchu mezi vnějším a vnitřním prostředím.

Větrání - řízená výměna vzduchu

- přirozené
- nucené

Přirozené větrání - výměna vzduchu je způsobena účinky větru a teploty

- množství průtoku vzduchu je řízeno uživatelem (větráním okny, ventilátorem, apod.)

Nucené větrání - k výměně vzduchu dochází činností větracího zařízení – mechanickým systémem

- množství vzduchu na větrání je řízeno uživatelem nastavením větracího systému

Filtrace - neřízená výměna vzduchu

- výměna vzduchu je způsobena kombinací účinků větru, teploty a větracího systému
- množství procházejícího vzduchu není ničím řízeno, probíhá bez zásahů uživatele, je neregulovatelné

Ze základního rozdělení a požadavků na vzduchotěsnost v kombinaci s hygienickými limity vyplývá, že větrání může být účinné pouze tehdy, bude li budova vybavena správným větracím systémem splňujícím základní podmínky.

Základní podmínky tedy jsou regulovatelnost a vzduchotěsnost větracího systému. [4]

Intenzita výměny vzduchu

Pro hodnocení vzduchotěsnosti obálky budovy se dle ČSN 73 0540 – 2 (2011) používá veličina intenzita výměny vzduchu n_{50} [h^{-1}]. n_{50} udává objemový tok netěsnostmi v obálce budovy při referenčním tlakovém rozdílu 50 Pa. Jedná se o nejrozšířenější a v běžné praxi nejpoužívanější veličinu pro hodnocení a posuzování vzduchotěsnosti staveb. Požadavky norem se samozřejmě liší s ohledem na způsoby zajištění větrání v budově. Výsledné hodnoty průvzdušnosti musí splňovat podmínky dané normou.

Podmínka:

$$n_{50} \leq n_{50,N}$$

$n_{50,N}$ - doporučená hodnota celkové intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa

Splnění podmínky se ověřuje měřením vzduchotěsnosti obálky budovy, pro něž existuje několik metod. Nejpoužívanější metodou je tzv. Blower door test. Tato metoda spočívá ve vyvolání tlakových rozdílů mezi vnitřním a vnějším prostředím pomocí jednoho či více ventilátorů.

Doporučené hodnoty intenzity výměny vzduchu jsou stanoveny v tabulce normy [1]

Tab. 1 Doporučené hodnoty intenzity výměny vzduchu podle ČSN 73 0540-2 (2011)

Větrání v budově	$n_{50,N} [h^{-1}]$	
	Úroveň I	Úroveň II
Přirozené nebo kombinované	4,5	3,0
Nucené	1,5	1,2
Nucené se zpětným získáváním tepla	1,0	0,8
Nucené se zpětným získáváním tepla v budovách se zvláště nízkou potřebou tepla na vytápění (pasivní domy)	0,6	0,4

Hodnoty úrovně I se doporučuje splnit vždy, hodnoty úrovně II se doporučuje splnit přednostně. [1]

Intenzita přirozené výměny vzduchu

Kromě požadavků na vzduchotěsnost jsou normou stanoveny požadavky na přirozenou výměnu vzduchu, která je však v případě pasivních domů výrazně omezena. Norma proto stanovuje minimální hodnoty pro přirozenou výměnu vzduchu v souladu s podmínkami dalších předpisů.

„Doporučuje se, aby průvzdušnost místnosti, kde se použije nuceného větrání nebo klimatizace, byla velmi malá. Hodnotí se pomocí výpočtem stanovené intenzity přirozené výměny vzduchu bez započtení funkce větracího nebo klimatizačního zařízení $n [h^{-1}]$, pro návrhové podmínky v zimním období. Doporučuje se, aby takto stanovená intenzita přirozené výměny vzduchu splňovala požadavek:

$$n \leq 0,05 h^{-1}$$

pokud zvláštní předpisy (vyhlášky a nařízení vlády) a provozní podmínky nepožadují hodnoty vyšší (Například v nouzovém provozním režimu při výpadku větracího zařízení).“ [1]

Výměny vzduchu v užívané a neužívané místnosti

Pro místnosti bez uvažování funkčního větracího zařízení je dále normou stanoven požadavek na nejnižší intenzitu výměny vzduchu v neužívané a užívané místnosti.

Není-li zvláštními předpisy určeno jinak, měla by nejnižší intenzita větrání místnosti, mimo dobu jejího užívání, splňovat požadavek:

$$n_{\min} \geq n_{\min,N} \quad \text{kde platí, že } n_{\min,N} = 0,1 \text{ h}^{-1}$$

Pro větrání užívané místnosti musí být splněn požadavek:

$$n \geq n_N$$

kde n_N je požadovaná intenzita větrání užívané místnosti, v h^{-1} , stanovená ze zvláštních předpisů na základě minimálních požadovaných průtoků vzduchu

Zároveň musí být v otopném období splněn požadavek:

$$n \leq 1,5 n_N$$

Tento požadavek zajišťuje dostatečnou výměnu vzduchu s ohledem na nízkou spotřebu energie. [1]

2.1.3 Vzduchotěsnost budov

V normách a předpisech pro hodnocení energetické náročnosti budov jsou kladeny náročné požadavky zejména na nízkoenergetické a pasivní budovy.

Z hlediska energetické náročnosti budovy je za významný parametr, mimo jiných, považována také vzduchotěsnost. Ta je závislá nejen na vzduchotěsnosti jednotlivých stavebních dílů, ale ve velké míře také na kvalitě provedení spojů.

Vzduchotěsnost prvku nebo obálky stavebního objektu, vyjadřuje schopnost propouštět vzduch. Čím méně vzduchu posuzovaný objekt netěsnostmi propustí tím je jeho vzduchotěsnost větší.

Vznik netěsností

Netěsnosti vznikají v obálce budovy neplánovaně jako následek chyb nejen při výstavbě, ale také ve fázi přípravy a návrhu. Nejčastějšími místy s projevy netěsností jsou styky navazujících konstrukcí, prostupy technologických zařízení a nedokonale provedená vzduchotěsnící vrstva. Netěsnosti mohou také vznikat použitím nekvalitních či snadno porušitelných materiálů.

Projevy netěsností

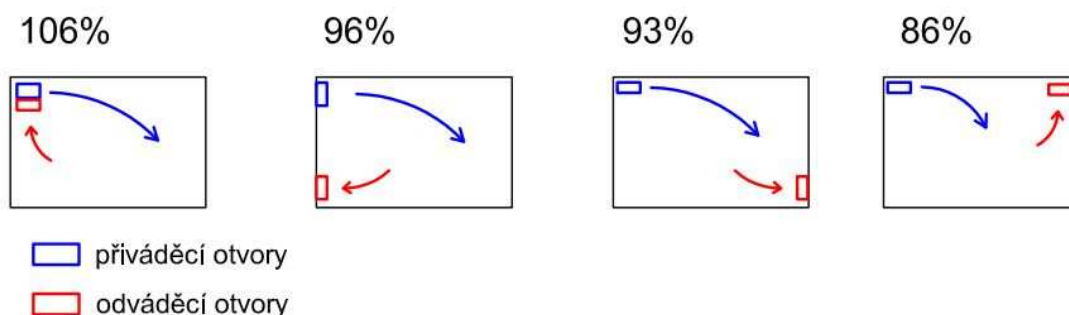
Každá neplánovaná netěsnost, která umožňuje filtraci vzduchu z nebo do budovy, se mnohdy významně podílí na energetických vlastnostech budovy. Zejména v zimním období může docházet k nežádoucím projevům netěsností v obvodovém plášti budovy, kdy vlivem podtlaku vyvozeným stoupajícím teplým vzduchem v interiéru, dochází k nasávání chladného venkovního vzduchu, což má za následek kondenzaci vodních par v místech netěsností, kde dochází ke styku prostředí s rozdílnou teplotou. Nejnepříznivější stav nastává při kondenzaci uvnitř konstrukce obvodového pláště. Dlouhodobé působení vlhkosti v těchto místech způsobuje degradaci materiálů, vznik tepelných mostů a růst plísní. S těmito problémy jsou spjaty rostoucí náklady za energie potřebné na vytápění, případně nemalé finanční náklady na sanace a opravy. Mimo to může docházet ke snižování komfortu uvnitř budovy vlivem proudícího chladného vzduchu, případně „chladného sálání“ ochlazovaných konstrukcí.



Obr. 2 Plíseň vzniklá následkem kondenzace vlhkosti procházející přes perforace v parozábraně [6]

Proudění vzduchu netěsnostmi má mimo výše popsané případy za následek také snižování účinnosti zařízení ZZT. Výrazné netěsnosti mohou zároveň zapříčinit nedokonalé proudění čerstvého vzduchu v prostoru a tím způsobit stagnaci znehodnoceného vzduchu v nedostatečně provětrávaných částech místnosti. Z těchto důvodů vyplývá, že by se měl vzduch do budovy dostávat pouze vhodně umístěnými otvory nebo zařízeními záměrně určeným k větrání s vhodným umístěním příváděcích a odváděcích otvorů. [3]

Účinnost větrání vzhledem k výměně vzduchu v prostoru místnosti



Obr. 3 Proudění vzduchu v závislosti na poloze přívaděcích a odváděcích otvorů [7]

Požadavky na vzduchotěsnost v ČR

V některých zemích, jako je například Anglie nebo severské státy, jsou požadavky na vzduchotěsnost nedílnou součástí projektové dokumentace. Test vzduchotěsnosti bývá prováděn za účelem doložení kvality provedeného díla a splnění stanovených požadavků.

V ČR byla při revizi normy ČSN 73 0540-2 v roce 2011 upravena kapitola s požadavky na vzduchotěsnost ve snaze dosažení vyššího standardu a souladu se zahraničními normami. Podrobnější požadavky a popis metod provádění měření vzduchotěsnosti jsou obsaženy v ČSN EN 13 829 (2001).

Jedná se o požadavky na:

- Celkovou vzduchotěsnost obálky budovy
- Vzduchotěsnost místností s nuceným větráním nebo klimatizací
- Průvzdušnost spár lehkých obvodových plášťů
- Vzduchotěsnost spár a netěsností ostatních konstrukcí obálky
- Ochranu tepelně-izolačních vrstev proti působení náporu větru

Pro dosažení nejlepších výsledků při stanovení hodnot průvzdušnosti je třeba brát zřetel na vzduchotěsnost ve všech fázích výstavby.

Od projektu až po realizaci díla na staveništi je nutné klást zvýšené nároky na kvalitu. Neboť nejen kvalita provedení na staveništi, ale i navržená konstrukční řešení stanovená ve fázi projektu mají významný vliv na výslednou hodnotu průvzdušnosti. Nutností je důsledné řešení všech detailů s důrazem na proveditelnost a jednoduchost.

Správným vyřešením vzduchotěsnosti a větrání s nalezením optimálního řešení souvisejícího s oběma požadavky, lze zvýšit kvalitu vnitřního prostředí a zlepšit životní podmínky v budovách. Jak již bylo popsáno výše, nežádoucí netěsnosti mohou zapříčinit výrazné lokální poklesy teploty vnitřních povrchů, případně i jiných částí konstrukcí kde může dojít ke kondenzaci (s následnými negativními dopady) a následně k růstu plísní. Tyto případy jsou, mimo jiné, ošetřeny požadavkem na dodržení teplotního faktoru vnitřního povrchu, resp. nejnižší povrchové teploty, při níž je zamezeno vzniku nežádoucích vlivů.

Dodržení tepelně technických požadavků zajišťuje zejména prevenci tepelně technických vad a poruch budov, tepelnou pohodu uživatelů, ochranu zdraví a zdravých životních podmínek a požadovaný stav vnitřního prostředí pro užívání a technologické procesy s nízkou energetickou náročností budov. [1]

Požadavky na spárovou průvzdušnost

Před revizí normy ČSN 73 0540 (2007) tato obsahovala požadavek na splnění spárové průvzdušnosti oken a lehkých obvodových plášťů, kde byla požadována téměř nulová průvzdušnost spár, vyjádřena součinitelem spárové průvzdušnosti i_{LV} , v $[m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot Pa^{-0,67}]$. [1] Pro stanovení hodnot netěsností spáry tak, aby odpovídaly hodnotám spárové průvzdušnosti srovnatelnými s hodnotami normy, neexistuje jednotná metodika. Všechny metody odhalování a stanovení prostupu vzduchu přes spáry v konstrukci neposkytují výsledky srovnatelné s tímto požadavkem. Jedná se o metody přiložením dlaně, detekce anemometrem, termovizní kamerou, kouřem a jiné. Všechny tyto metody vyžadují vyvinutí dostatečného tlakového rozdílu uvnitř budovy oproti tlaku venkovnímu. Právě v tomto byla shledána velká nejistota, protože hodnota tlakového rozdílu pro tyto detekční metody nebyla stanovena. A tak při různých tlacích mohou vycházet různé výsledky, kdy například při nízkém tlakovém rozdílu mohou být výsledky vyhovující, zatímco při zvýšeném rozdílu již nikoliv.

Zřejmě z těchto důvodů byl požadavek na spárovou průvzdušnost odstraněn.

Vzhledem k současným požadavkům na co největší vzduchotěsnost nízkoenergetických a zejména pasivních domů, produkují výrobci okna umožňující absolutní utěsnění. Výjimkou mohou být velkoformátová posuvná okna sloužící obvykle jako vstup na terasu či balkón.

U těchto oken může docházet při větších rozměrech k průhybu rámu a tím ke snížení těsnosti zabudovaného těsnění.

V aktuálně platné normě ČSN 73 0540-2 jsou definovány požadavky pouze na průvzdušnost spár lehkých obvodových plášťů. [1]

Průvzdušnost spár a netěsností ostatních konstrukcí obálky budovy

Kromě výše popsaných spár se ve stavebních konstrukcích vyskytují další otvory, které ve většině případů nejsou vytvořeny za účelem větrání. Výskyt těchto netěsností je nežádoucí, jejich eliminace obtížná a jejich vznik nelze nikdy zcela vyloučit. Snahou je přiblížit se podmínkám dokonalého utěsnění a zároveň umožnit větrání v souladu s hygienickými požadavky a předpisy.

Pro dosažení různých požadavků se proto používají větrací zařízení umožňující regulaci, případně i úpravu, přiváděného a odváděného vzduchu. Také u těchto zařízení a rozvodů vzduchotechniky v objektu je třeba dbát na co nejkvalitnější utěsnění.

Odhalování netěsností

V průběhu testu vzduchotěsnosti se obvykle provádí lokalizace míst netěsností a určení její míry. Lokalizace těchto míst se v praxi provádí ve fázi výstavby objektu, kdy je možné nalezené netěsnosti opravit. Pro odhalování netěsností se běžně používají nejčastěji tyto metody a pomůcky:

- přiložení holé dlaně
- anemometr
- termovizní kamera
- vyvíječ dýmu

Postupy odhalování netěsností

Z výše popsaného vyplývá, že u všech těchto metod je potřeba vytvořit tlakový rozdíl, aby byly případné netěsnosti detekovatelné.

Metoda detekce netěsnosti přiložením holé dlaně je nejpoužívanější, nejsnazší a nejlevnější metoda. Provádí se při vyvolání podtlaku v budově. K místům s předpokládanou netěsností přiložíme holou dlaň a hledáme místa s citelným průvanem. Pro zvýšení citlivosti se doporučuje dlaň navlhčit vodou.

Výhodou této metody je možnost celoročního provádění. Tímto způsobem je možné odhalovat netěsnosti svépomocí, za použití jakéhokoliv ventilátoru pro vytvoření tlakového rozdílu, kdy však nastává riziko poškození vzduchotěsnicí vrstvy z důvodu nekontrolovatelného podtlaku. Nevýhodou je možnost pouze lokální kontroly.

Detekce anemometrem se provádí při zajištění stejných podmínek jako při použití holé dlaně. Při podtlaku v budově, se místa s možnými projevy netěsností procházejí s přiložením sondy reagující buďto na změnu teploty vyvolanou prouděním vzduchu, nebo přímo na rychlost proudění vzduchu. Pouze podle rychlosti proudění vzduchu není možné přesně stanovit velikost netěsností, proto se také tato metoda používá jen pro hledání netěsností. Avšak na rozdíl od předchozí metody, je zde umožněno zaznamenávat aspoň nějaké naměřené hodnoty.



Obr. 4 Termický anemometr s teleskopickou sondou (vlevo), anemometr s turbínou (vpravo)
[www.e-pristroje.cz]

Nejpřesnější metodou odhalování netěsností je použití termovizní kamery. Ve srovnání s ostatními metodami, vyžaduje tato minimální teplotní rozdíl vnějšího a vnitřního prostoru 5°C . Opět je zde vyžadováno vyvození podtlaku v interiéru a určení míst s možnými netěsnostmi. Samotná detekce se provádí snímkováním, nejlépe před a po vytvoření tlakového rozdílu, což umožní porovnání snímků daného místa při těchto tlakových situacích. Netěsnosti, se při nasávání vzduchu přes spáry v konstrukcích projevují ochlazením jejich povrchů. Výhoda použití termovizní kamery spočívá v rychlosti a přesnosti. Nevýhodou oproti ostatním metodám je nemožnost provádět měření celoročně, kdy je nutné čekat na vhodné teplotní podmínky. Dále je značnou nevýhodou velmi vysoká cena termovizních zařízení.



Obr. 5 Termokamera pro základní diagnostiku staveb
[www.termokamery-flir.cz]

Vyvíječ dýmu je možné použít jak při podtlaku tak při přetlaku v budově. Při přetlaku se umístí do budovy zařízení produkující hustý dým, jež je produktem chemické reakce různých látek, který je možné vizuálně sledovat při prostupu netěsnostmi z testovaného objektu do vnějšího prostředí. Metoda se za těchto podmínek a pro svou nepřesnost používá výjimečně. Používanější je detekce dýmem při podtlaku. Opět stejně jako u předchozích metod jsou kontrolována místa s eventuelními netěsnostmi uvnitř objektu přiložením pomůcek s látkami produkujícími kouř. Metoda je stejně účinná jako přiložení dlaně nebo detekce anemometrem, umožňuje však vizuální kontrolu proudění vzduchu. Nevýhodou je opět pouze lokální kontrola.



Obr. 6 Vyvíječ dýmu při detekci přetlakem, produkovaný kouř je netěsnostmi odsáván ven
[archív autora diplomové práce]

U všech odhalených netěsností je třeba počítat s tím, že mezera, kterou proudí vzduch přes konstrukci zakrývající další vrstvy, se může nacházet právě v těchto zakrytých vrstvách a to v jiném místě než je místo detekované na povrchu viditelné části konstrukce. Takové případy se vyskytují zejména u dřevostaveb, kde je vzduchotěsnicí vrstva zakrytá bedněním.

Působením tlakového rozdílu v případě neutěsněné vzduchotěsnicí vrstvy může být dosahováno výrazně odlišných výsledků při měření podtlakem a přetlakem. Při přetlaku nemusí dojít k velkým projevům nedokonalostí v důsledku utěsnění spojů (přesahů) samotným režimem přetlaku. Na druhou stranu při podtlaku dochází k rozevírání nedokonale slepených spojů a k nasávání velkého množství vzduchu. Z těchto důvodů se provádí měření při obou tlakových rozdílech.

Nalezení netěsností pomocí popsaných pomůcek a metod není složité, vyžaduje však znalosti určitých principů a zkušenosti technika. [8]

3. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Následující část popisuje cíle diplomové práce a důvody volby těchto cílů. Jelikož je téma velmi široké, bližším studiem jsem vyspecifikoval hlavní cíl. K jeho dosažení byly stanoveny 3 varianty testů, využité již při prvním měření.

3.1 Stanovení cílů

Cílem této diplomové práce bylo posoudit vliv volby vstupních parametrů zařízení Blowerdoor testu na výslednou hodnotu průvzdušnosti. Vstupními parametry se pro účely diplomové práce rozumí rozmezí tlakových intervalů a jejich vliv na hodnotu průvzdušnosti.

3.2 Důvod k volbě těchto cílů

Měření byla prováděna dle doporučení normy ČSN EN 13 829 [2] a byla ovlivněna mnoha faktory, zejména netěsnostmi výplní otvorů a rychlostí proudění větru.

Před spuštěním samotného testu se do měřicího softwaru zadává určité množství vstupních parametrů a okrajových podmínek stanovených v závislosti na okolních podmínkách. Často se jedná i o subjektivní hodnocení technika.

Jedním ze vstupních parametrů je volba rozsahu tlakových rozdílů. Jedná se zpravidla o deset hodnot, jež jsou zadávány do měřicího softwaru. V závislosti na doporučení současně normy jsou ve výchozím nastavení tyto hodnoty v rozsahu 25 až 70 Pa v krocích po 5 Pa. Avšak nastávají případy kdy z důvodu různých klimatických podmínek a geometrických tvarů budov je nutné tyto kroky a rozsah upravit.

Cílem je určit jak velké rozdíly měření nastanou při volbě jiných než v současnosti doporučovaných tlakových rozdílů.

3.3 Prostředky ke splnění cílů

Přístrojové vybavení fakulty stavební z ústavu pozemního stavitelství VUT v Brně.

Pro vyhodnocení dat byl použit software Tectite Express dodávaný společně se zařízením Minneapolis Blower Door™

3.3.1 Přístrojové vybavení

- Minneapolis Blower Door™ - ventilátor s proměnným výkonem, flexibilním osazovacím rámem, vzduchotěsnou plachtou
- Software Tectite Express 3.6.7.0, který je součástí zařízení Minneapolis Blower Door™

- Software Microsoft Office Excel a Word 2007
- Termokamera Flir B425
- Notebook, Lenovo R500 s OS Windows 7 Professional 32bit



Obr. 7 Ventilátor zařízení Bloower Door osazený ve vstupních dveřích (vlevo), termokamera Flir B425 (vpravo)
[archív autora diplomové práce, www.termokamery-flir.cz]

3.3.2 Experimentální objekty

Jako experimentální objekty pro účely diplomové práce byly vybrány a poskytnuty dva rodinné domy, jeden experimentální objekt dřevostavby a místnost v prostorách VUT-FAST.

Experimentální objekt č.1: Učebna D205 v prostorách VUT-FAST

Experimentální objekt č.2: Rodinný dům, U hájenky, Moravské Knínice

Experimentální objekt č.3: Řadový rodinný dům, Veselská 1, Popůvky

Experimentální objekt č.4: Experimentální objekt VUT, Kulkova 10, Brno



Obr. 8 Experimentální objekty – zleva objekt č. 1, č. 2, č. 3, č. 4 [archív autora diplomové práce]

4. METODY ZPRACOVÁNÍ

Následující kapitola popisuje metody, jimiž byla prováděna měření. Dále jsou zde popsány způsoby zpracování výsledků, postupy použité při získávání dat a varianty zvolených tlakových rozdílů.

4.1 Měření vzduchotěsnosti

Měření bylo prováděno nejpoužívanější metodou – metodou tlakového spádu s externím ventilátorem. Tato metoda je jak ve světě, tak v ČR známá pod názvem Blower Door test. Používá se nejen pro měření vzduchotěsnosti, ale i pro detekci netěsností.

Aby bylo možné toto zařízení použít, existují dvě základní kritéria, která musí být splněna, chceme-li vytvořit podmínky pro měření množství vzduchu procházejícího konstrukcí. Jsou to tyto:

- konstrukce nesmí být absolutně těsná
- konstrukce musí být vystavena tlakovému rozdílu mezi prostředími, jež jsou konstrukcí oddělena

4.1.1 Metodika provádění blowerdoor testu

Norma ČSN EN 13829 [2] stanovuje dva typy zkušebních metod. Metody jsou označovány písmeny A a B. Volba metody závisí na účelu prováděného testu. Jde o metody nejpoužívanější a legislativně uznávané. Nikde však není pevně stanoveno, že by právě tyto dvě metody byly jediné možné. V tabulce 2 je uvedeno jedno z jejich možných rozdělení.

Tab. 2 Rozdělení používaných metod

Metoda	Užití metody
A certifikační	Provádí se na dokončené provozuschopné budově i ve fázi užívání Výsledky vypovídají o celkové vzduchotěsnosti
B certifikační	Měření ve fázi dokončené vzduchotěsné vrstvy s možností oprav Výsledky vypovídají o kvalitě provedení vzduchotěsné vrstvy Provádí se např.: za účelem doložení certifikátu pro program „zelená úsporám“
A necertifikační	Slouží k detekci netěsností ve fázi užívání stavby Vhodné používat pro lokalizaci netěsností vždy ve spojení s prokazatelnými detektory těchto netěsností
B necertifikační	Ověření vzduchotěsnosti obálky budovy Slouží k detekci netěsností za účelem jejich oprav

Metoda A:

Metoda A se provádí u staveb v provozním stavu. Budova se ponechá ve stavu typickém pro období, kdy je v provozu systém vytápění nebo chlazení. Veškeré otvory v obvodových konstrukcích (okna, dveře, uzavírací klapky větracích zařízení) se uzavřou. Jsou-li v budově zařízení s otevřeným topeništěm (krby, kamna), je nutné takovéto spotřebiče vyčistit a odstranit z nich popel, aby nedošlo k jeho rozvíření do prostoru při podtlaku vyvolaném v průběhu testu. Důležité je také zkontrolovat vyústění odpadů, zda jsou sifony zaplněny vodou. Pokud z nějakého důvodu nejsou odpadní otvory napuštěny je třeba je utěsnit.

Metoda B:

Metoda B se provádí za účelem stanovení vzduchotěsnosti obálky budovy u staveb v takovém stádiu výstavby, při kterém by bylo možné opravit případné nedokonalosti zjištěné v průběhu provádění testů. U této metody je normou požadováno zavření a zapečetění všech otvorů v obvodové konstrukci. Kromě výše popsaných otvorů je třeba utěsnit například komíny, odtahy digestoří, kanalizační potrubí, větrací mřížky, výlezy do podkroví atp.

Pro dočasné utěsnění je výhodnější používat levné, méně kvalitní materiály. Stav všech dočasně utěsněných otvorů je třeba v průběhu testu kontrolovat, aby nedošlo k jejich uvolnění a tím ke znehodnocení měření. K následným opravám netěsností, které byly zjištěny během měření je již nutné použít kvalitní výrobky.

Pro obě metody platí, že objekt musí být nakonfigurován tak, aby při změnách tlaku v průběhu testu reagoval jako celek. Toho dosáhneme otevřením všech dveří uvnitř objektu a to takovým způsobem, aby bylo možné udržovat tlak v toleranci do 10% oproti tlakovému rozdílu mezi vnějším a vnitřním prostředím. Pouze u varianty testu B se obvykle uzavírají dveře do nevytápěných prostor, jako jsou garáže nebo sklepy. Dále je třeba dát pozor na okolní konstrukce a předměty v bezprostřední blízkosti ventilátoru. Ventilátor je možné osadit do rámu dveří, aniž by bylo nutné vysazovat křídlo. Je však třeba během testu zajistit dvevní křídlo v takové poloze, ve které nebude ovlivňovat proudění vzduchu vyvolané činností ventilátoru. Osazení ventilátoru do otvoru v blízkosti protilehlé stěny, nebo pohyb či umístění překážek do vzdálenosti menší než 2 m před nebo za ventilátor, může ovlivnit výsledky měření. Také je třeba dbát na to, aby hadička tlakového čidla byla co nejdále od ventilátoru a pokud možno ve vodorovné poloze.

Výše popsaná opatření a postupy provádění testu byly v mnoha zemích standardizovány za účelem dosažení co nejvyšší přesnosti a možnosti srovnávání jednotlivých měření.

Dále má měřící technik na výběr, zda bude provádět měření ovládané automaticky softwarem, nebo zda bude otáčky ventilátoru ovládat prostřednictvím softwaru manuálně. Za ideálních podmínek je možné svěřit průběh měření automaticce. Pro zvýšení přesnosti získaných dat je i v těchto případech výhodnější manuální ovládání. Navíc při automatickém měření probíhá nárůst tlakového rozdílu velmi rychle, což může u některých případů vyvolat přerušení testu samotným programem s upozorněním na nadměrné kolísání tlaku pro aktuální cílovou hodnotu tlakového rozdílu. Oproti tomu při manuálním ovládání, kdy je možné nárůst tlakového rozdílu zvyšovat pozvolna, toto přerušení odpadá. Měření může být potom přerušováno pouze upozorněním na výměnu clony pro stabilnější udržení průtoků vzduchu při určitých tlakových rozdílech.



Obr. 9 Kruhové plastové clony A, B, C [archív autora diplomové práce]

Volba tlakových rozdílů

Měřící body se volí tak, aby byl vyloučen vliv klimatických podmínek. Vždy záleží na zkušenostech měřícího technika a aktuálních klimatických vlivech v dané lokalitě.

Norma doporučuje provést měření v minimálně 5 měřících bodech, kde se doporučuje, aby minimálně polovina z těchto bodů byla měřena při přetlaku větším než 50 Pa. Výsledky

získané při měření pod 25 Pa jsou obvykle prohlašovány za neplatné. Zejména v případě větrného počasí je doporučeno měřit s větším tlakovým rozdílem až 100 Pa.

Tlakový rozdíl získaný při měření je nutné opravit odečtením základního tlakového rozdílu. Základní tlakový rozdíl je přirozený tlakový rozdíl vyvolaný účinkem větru a teploty, v průběhu testu se mění v závislosti na okolních podmínkách, proto se měří před i po testu. Díky tomu je umožněno srovnávat jednotlivá měření různých objektů. [2]

4.1.2 Zvolené postupy

Vstupní parametry

Objemy vnitřních prostorů, podlahové plochy a plochy obálek měřených prostorů byly spočítány buďto přímo na místě nebo z rozměrů daných výkresovou dokumentací. Dokumentace byla poskytnuta majiteli měřených objektů. Dokumentace se nachází v přílohách v elektronické podobě.

Do objemů nebyly přímo zahrnuty prostory mezi ostěním otvorů, nábytek a jiné vybavení. Tato okrajová podmínka je obvykle vyjádřena hodnotou stavební neurčitosti. Avšak dle výsledků diplomové práce Ing. Michaely Horáčkové na téma vlivu výpočtové hranice obálky budovy na hodnotu průvzdušnosti je doporučeno, aby objemy testovaných prostorů byly stanoveny početně co nejpřesněji z důvodu nezanedbatelného zkreslení výsledů při nesprávné volbě stavební neurčitosti. Toto doporučení pro vyjádření požadavku na co nejpřesnější určení vnitřního objemu zatím není zakotven v legislativě. [5]

Pro účely této diplomové práce je zahrnutí vnitřního vybavení a prostoru mezi ostěním otvorů hodnotou stavební neurčitosti dostačující. Stavební neurčitost byla stanovena vždy s ohledem na konkrétní situaci a to odhadem na základě zkušeností a doporučení vedoucího diplomové práce.

Teploty byly dosazovány podle aktuální předpovědi pro danou lokalitu. Rychlost větru byla zadávána dle Beaufortovy stupnice podle aktuálních povětrnostních podmínek.

Měření nebyla prováděna za účelem zjištění přesné hodnoty průvzdušnosti, ale za účelem stanovení rozdílů mezi těmito hodnotami v závislosti na vlivu okrajových podmínek

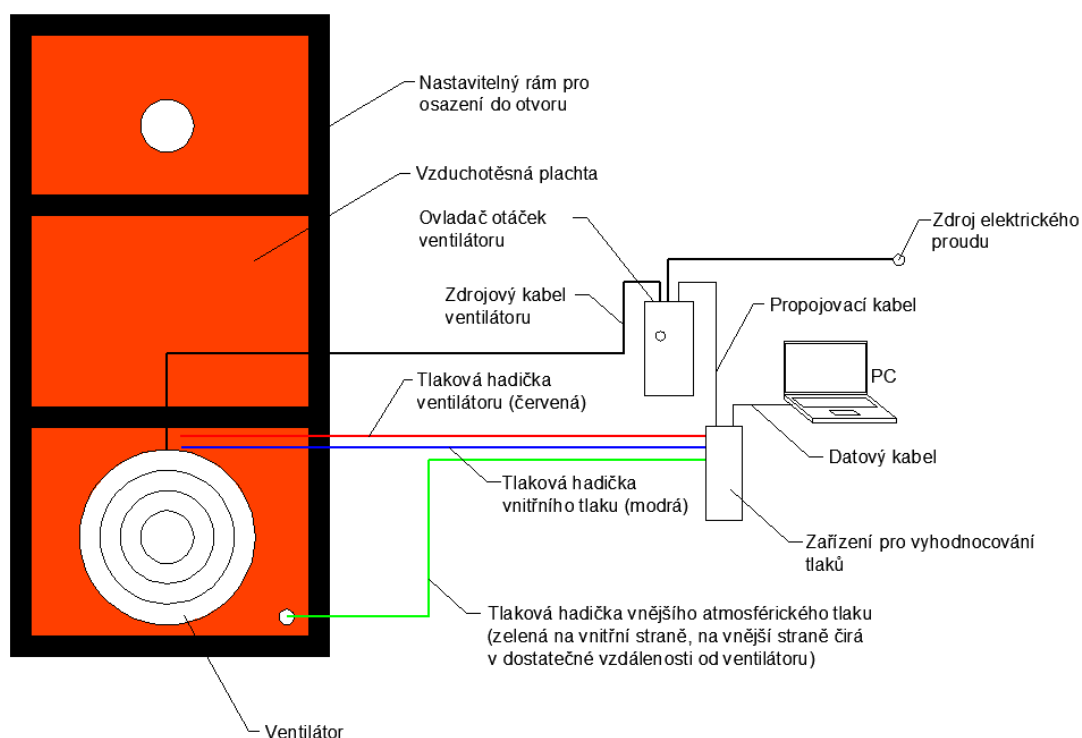
a vstupních parametrů. Jak již bylo vysvětleno výše, přesné stanovení objemů, není pro účely této diplomové práce rozhodující, hlavním úkolem bylo posoudit výsledky získané při měření za různých tlakových rozdílů.

Postup přípravy testů

Před každým měřením bylo sestaveno zařízení blowerdoor dle pokynů popsanych v manuálu dodávaném k zařízení Minneapolis Blower Door™. Nastavitelný rám s ventilátorem byl vždy umístěn do vstupních dveří a případné mezery mezi tímto rámem a zárubněmi byly přelepeny páskou. Takto osazené zařízení bylo propojeno pomocí hadiček a kabelů s regulátorem otáček, zařízením vyhodnocujícím tlakové rozdíly a s notebookem s ovládacím a výpočetním softwarem. Navíc byla provedena určitá opatření, jež se lišila v závislosti na konkrétních podmínkách a budou popsána dále u jednotlivých experimentálních budov. Jedná se o defekty některých konstrukcí, které bylo nutné redukovat, jelikož by jejich netěsnost omezila schopnost zařízení „nafouknout“ posuzovaný prostor. V ovládacím softwaru byl v automatickém režimu nastaven nulový krok chodu ventilátoru. Otáčky byly tedy ovládány manuálně.



Obr. 10 Zalepení velmi netěsných spár vstupních dveří do sklepa (vlevo) a spár okolo dvířek krbových kamen (vpravo) [archív autora diplomové práce]



Obr. 11 Schéma zapojení Blower door zařízení [archív autora diplomové práce]

Časový průběh měření

Samotné výše popsané sestavení zařízení proběhlo vždy v rozmezí 15-20 min.

Před spuštěním testu probíhala po dobu 10-15 min detekce netěsností v obálce objektů při tlakovém rozdílu 50 Pa. V případě nutnosti byly poopraveny ty netěsnosti, u nichž by bylo možné zajistit dostatečnou vzduchotěsnost jednoduchými úpravami, například výměnou či doplněním kvalitního pryžového těsnění u výplní otvorů. Ostatní stavební konstrukce, u nichž se předpokládá dostatečné utěsnění již ve stádiu realizace budovy, byly ponechány bez jakýchkoliv zásahů.

Na všech objektech proběhlo měření všech variant zvolených tlakových diferencí. Doba, po kterou byla zaznamenávána data, se pohybovala v rozmezí 2 - 2,5 h v závislosti na mnoha faktorech. Při jedné variantě tlakových rozdílu tak mohla být dostatečně přesná data získána rychleji, než u jiné varianty kde ustálení na požadovaném tlakovém rozdílu mohlo trvat déle, například při nepříznivých klimatických podmínkách.

Celkový čas jedné série měření, jednoho objektu, se tak pohybuje mezi 2,5 až 3 hodinami.

Volba hodnot tlakových rozdílů

Byly zvoleny 3 varianty rozsahu tlakových rozdílů, jejichž intervaly se navzájem překrývají.

Varianta 1

Standardní rozmezí tlakových rozdílů 70 až 25 Pa dle výchozího nastavení softwaru vycházející z doporučení normy. Měření probíhalo vždy sestupně od nejvyššího nadefinovaného tlakového rozdílu k nejnižšímu s odstupňováním po 5 Pa.

Varianta 2

Rozmezí nízkých tlakových rozdílů 32 až 5 Pa s rozestupy záznamů po 3 Pa. Stejně jako u varianty 1 byla data zaznamenávána v deseti bodech při postupně klesající tlakové diferencii. Hodnota nižší než 50Pa byla zvolena z důvodu použití jednotné clony.

Varianta 3

Rozmezí vysokých tlakových rozdílů 80 až 53 Pa s rozestupy záznamů opět po 3 Pa. Záznam a průběh měření se shoduje s oběma výše popsanými variantami.

Data byla pro všechny varianty zaznamenávána v deseti bodech. Jednotlivé body představují průměrné hodnoty ze 100 tlakových rozdílů blížících se přednastaveným tlakovým diferencím dle jednotlivých variant. Při režimech podtlaku i přetlaku byly zachovány stejné okrajové podmínky, rozložení celé sestavy zůstalo zachováno, pouze ventilátor bylo nutné pro změnu režimu otočit. Jen v jednom případě bylo v průběhu měření potřeba změnit hodnotu síly působení větru podle aktuální situace.

4.2 Experimentální objekty a prostory

Pro potřeby diplomové práce byly vytyčeny 3-4 skutečné stavby, jedna místnost a jeden experimentální objekt. Vzhledem k časové náročnosti provádění měření zahrnujícího 3 varianty testů, nebylo snadné sehnat stavebníky s dostatečným časovým uvolněním. Měření tedy probíhalo na následujících objektech:

Experimentální objekt č.1: Učebna D205 v prostorách VUT-FAST

Experimentální objekt č.2: Rodinný dům, U hájenky, Moravské Knínice

Experimentální objekt č.3: Řadový rodinný dům, Veselská 1, Popůvky

Experimentální objekt č.4: Experimentální objekt VUT, Brno - Židenice

4.2.1 Experimentální objekt č.1: učebna D205 v prostorách VUT-FAST

Jedná se o jediné měření, kde byla jako testovaný prostor použita samostatná místnost a to konkrétně učebna D205 v prostorách školy. Tuto místnost lze zjednodušeně považovat za prostory srovnatelné s velmi malými a těsnými stavbami. Obvodové stěny jsou vyzděny z cihel plných pálených, z vnější strany jsou cihly příznány, jedná se tedy o režné zdivo. Vnitřní povrchy jsou tvořeny omítkou. Nábytek a vybavení místnosti bylo zahrnuto do výpočtů programu hodnotou stavební neurčitosti 2%. Z rozměrů místnosti změřených na místě byly vypočteny vstupní údaje - objem, podlahová plocha a plocha obálky místnosti. Vzduchotěsnicí vrstvu zde tvoří omítka. Měření probíhalo v zimním období za klidných povětrnostních podmínek. Všechna okna v místnosti byla řádně uzavřena.



Obr. 12 Experimentální objekt č.1: učebna D205 v prostorách VUT-FAST (vyznačeno rámečkem)
[archív autora diplomové práce]

4.2.2 Experimentální objekt č.2: Rodinný dům U hájenky, Moravské Knínice

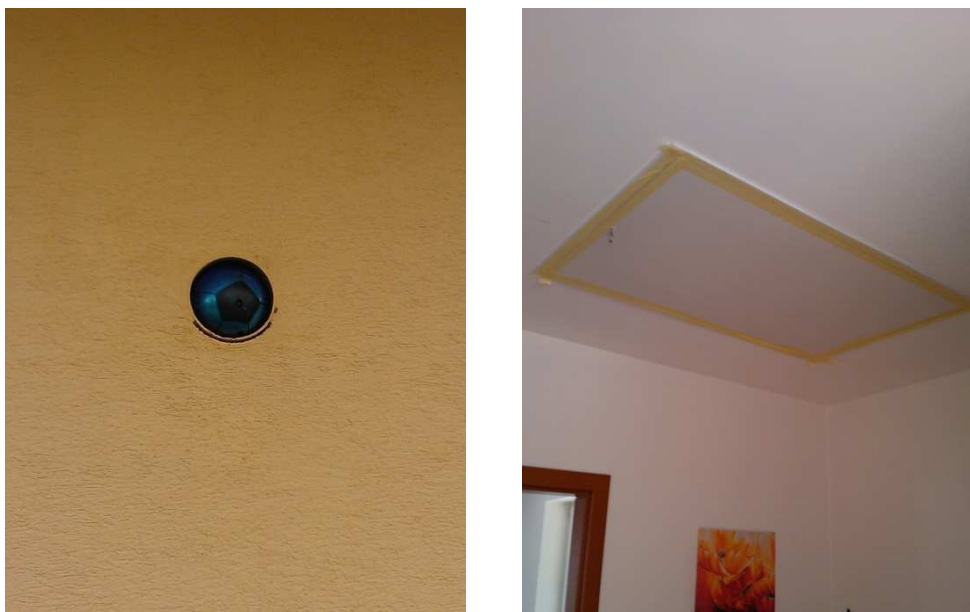
Měření probíhalo v Moravských Knínicích na rodinném domě postaveném v roce 2006 z cihelných bloků typu „therm“. Dům má čtvercový půdorys, dvě nadzemní a jedno podzemní podlaží, je zastřešen sedlovou střechou. Výplně otvorů tvoří plastová okna a dveře. Vstup do domu je orientován k jihu. Většina otvorů je pak orientována na jižní a zejména západní stranu. Na severozápadním rohu domu se nachází terasa. Ve 2.NP je nad touto terasou lodžie.

V domě se nenachází krb ani klimatizace. Vytápění je řešeno pomocí plynového kotle, jehož spaliny jsou odváděny zděným komínem procházejícím přibližně středem budovy. Komínové zdivo je omítnuto po celé výšce, samotné těleso by tedy mělo být vzduchotěsné. Stavba je z vnější i z vnitřní strany omítnuta. Jako u většiny zděných budov plní i zde vnitřní omítky vzduchotěsnou vrstvu.



Obr. 13 Experimentální objekt č.2, Moravské Knínice [archív autora diplomové práce]

Objekt se nachází na okraji zástavby nových rodinných domů, kde z jihovýchodní strany není krytý a je tak vystaven poryvům větru. Suterén budovy, v němž se nachází jedna vytápěná místnost, technická místnost a garáž, byl započítán do celkového objemu obytné zóny z důvodu častého užívání obyvateli domu. Přestože byl test prováděn na dokončené stavbě, byla zvolena metoda měření B. Proběhlo utěsnění a přelepení míst s možnými výraznými netěsnostmi lepící páskou z důvodu dosažení měřitelných tlakových rozdílů, kdy by nebylo možné v případě nízkých tlakových rozdílů dosáhnout požadovaných výsledků. Jednalo se o vývod digestoře, ventilátory na wc a v koupelně, komínová dvířka, prostup na půdu a spáry vstupních dveří do sklepa ze zahrady včetně prostupu pro psa. Stavební neurčitost byla do výpočtu zahrnuta hodnotou 10%.



Obr. 14 Utěsnění prostupu digestoře balónkem (vlevo), Utěsnění spár prostupu na půdu (vpravo) [archív autora diplomové práce]

4.2.3 Experimentální objekt č.3: Řadový rodinný dům, Veselská 1, Popůvky

Pro další měření byl majiteli poskytnut menší okrajový řadový dům postavený v letech 2003-2004. Jednalo se o dvojpodlažní dům s obytným podkrovím s téměř čtvercovým půdorysem s okny orientovanými na východ a západ. Objekt je postaven ze systému keramických



Obr. 15 Řadový rodinný dům, Veselská 1, Popůvky [archív autora diplomové práce]

cihelných bloků, zastřešený sedlovou střechou. Ze strany interiéru je konstrukce střechy zakryta sádkartonovými deskami. Součástí střechy jsou 3 vikýře. Větší vikýř s menším oknem je orientován na západní stranu, další dva menší vikýře se nacházejí na straně východní. Dům je vytápěn plynovým kotlem. V obývacím pokoji se nachází krbová kamna,

u kterých bylo nutné utěsnit spáry lepící páskou kvůli případnému riziku rozvření popela do interiéru. Vyčištění krbu nebylo provedeno z důvodů časové náročnosti měření. Na východní straně domu se nachází zahrada se vzrostlou zelení.

Na západní straně dům přiléhá k veřejné komunikaci, kde se na protější straně rozprostírají nezastavěné pozemky.

Ve výpočtu byl objekt uvažován jako částečně exponovaný. Jako u předchozího objektu i zde tvoří hlavní vzduchotěsnou vrstvu omítky. V podkroví byl pro výpočet plochy obálky budovy za vzduchotěsnou vrstvu považován podhled.

4.2.4 Experimentální objekt č.4: Experimentální objekt VUT, Kulkova 10, Brno

Experimentálním objektem je dřevostavba vybudovaná stavební fakultou VUT v Brně. Budova o čtvercovém půdorysu je dvoupodlažní, založená na základových pásech tvořených tvárnicemi ztraceného bednění, zastřešena plochou pultovou střechou. V obou podlažích se nachází dvě plastová okna s izolačním dvojsklem s orientací na jihozápad a vstupní dveře



Obr. 16 Experimentální dřevostavba VUT-Fast [archív autora diplomové práce]

na severní straně objektu. Podlaží nejsou funkčně propojena. Pro přístup ke vstupu do druhého nadzemního podlaží slouží přímé dřevěné schodiště umístěné vně objektu. Konstrukci stěn tvoří nosné sloupky s horizontálním laťováním a s výplní ze skelné vaty tl.150 mm. Z vnější strany je ke sloupkům kotven dřevěný rošt vyplněný fasádní minerální vlnou o tloušťce 150 mm.

Ze strany interiéru je konstrukce opláštěná OSB deskami tloušťky 15 mm, tvořícími vzduchotěsnou vrstvu. Testované podlaží je rozděleno na zádveří a dvě místnosti, z nichž jedna má na interiérové straně OSB bednění nanesen latexový nátěr pro dosažení větší vzduchotěsnosti. Na OSB desky jsou následně připevněny sádkokartonové desky tl.12,5 mm.

Strop nad oběma podlažími je tvořen dřevěnými nosníky o rozměrech 220x80 mm v osových rozestupech 625 mm. Prostor mezi nosníky stropu 1.NP je ponechán prázdný a celá konstrukce je z horní strany zakryta OSB deskami tl. 25 mm. Prostor mezi nosníky stropu 2.NP je vyplněn skelnou vatou. Záklop je proveden z OSB desek tl.25 mm s hydroizolační fólií na horní straně. Ke spodní, interiérové straně, je přikotvena parotěsná fólie. Tato fólie je přitlačena ke stropním nosníkům kovovými CV profily s dotěsněním bitumenovými páskami. Parotěsná fólie je v několika místech perforována procházejícími elektrokabely. Tato místa jsou přelepena vysoce odolnými parotěsnými páskami, stejně tak jako rámy oken a dveří v kontaktu se stěnovými prvky.

Spoje OSB desek na podlaze v laboratorních místnostech byly přelepeny univerzální těsnicí páskou. V zádveří, zvaném obslužná místnost, je na stropní konstrukci položena difúzní fólie, následně minerální desky jako kročejová izolace o tl.60 mm zaklopenými opět OSB deskami 2x12 mm PD.

Fasáda testovaného 2NP je řešena jako provětrávaná. Z tohoto důvodu je tepelná izolace z vnější strany zakryta fasádní pojistnou hydroizolační fólií přisponkovanou k dřevěnému roštu. Dále jsou na rošt kotveny svislé latě, jež tvoří otevřenou vzduchovou mezeru v tloušťce 40-60 mm. Na tyto latě je připevněno vodorovné deštění z dřevěných desek kladených dostatečně přes sebe s vytvořením mírného sklonu každé desky proti zatékající srážkové vodě.

5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

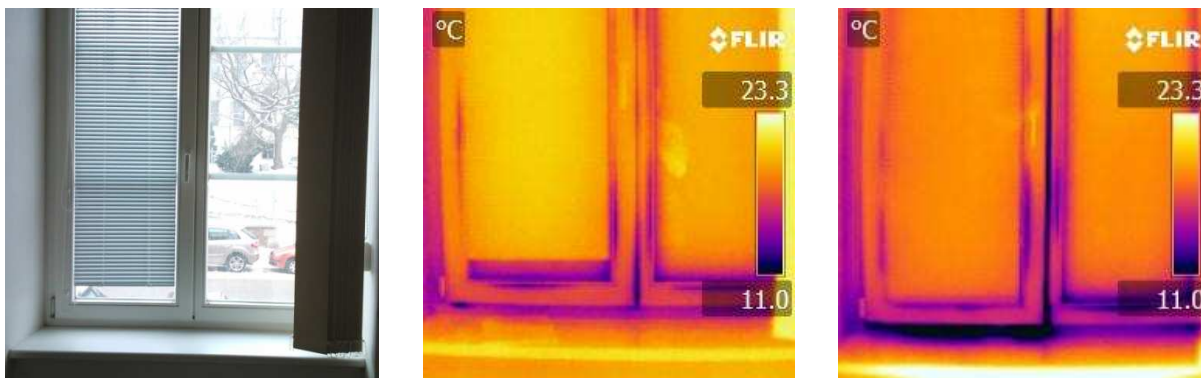
V následující části je pro všechny experimentální objekty podrobněji rozepsán postup měření a vyhodnocení výsledků jednotlivých variant tlakových diferencí.

5.1 Experimentální objekt č.1: učebna D205 v prostorách VUT-FAST

5.1.1 Průběh testu a vyhodnocení

Jelikož se jedná o místnost přístupnou z interiéru budovy, ventilátor zde nebyl osazován do otvoru oddělujícího vnitřní prostředí od venkovního, ale byl osazen do otvoru dveří vedoucích ze sousední chodby do posuzované místnosti. Vzhledem k tomu, že měření probíhala v prostorách školy, byla v několika případech zaznamenávaná data ovlivněna provozem v prostoru chodby, což mělo vliv na růst odchylky tlakových rozdílů.

Před spuštěním testu byl ventilátorem vyvolán tlakový rozdíl 50 Pa, během něhož proběhla kontrola těsnosti oken. Okna byla snímána termovizní kamerou. Za pomoci ručního anemometru byla kromě teploty zaznamenávána také rychlost proudění vzduchu přes okenní spáry.



Obr. 17 Termosnímky oken - tmavá místa zřetelně znázorňují nižší povrchovou teplotu v důsledku proudění chladného vzduchu netěsnými spárami (z leva: fotografie ve viditelném spektru, infra snímek těsného okna, infra snímek okna s netěsnými spárami) [archív autora diplomové práce]

Přiložením teleskopické sondy byla okolo spár uzavřeného okna naměřena rychlost proudícího vzduchu $0,18 \text{ m.s}^{-1}$. U netěsných spár oken měl proudící vzduch rychlost od $0,55 \text{ m.s}^{-1}$ po $1,14 \text{ m.s}^{-1}$. Ochlazující účinek vzduchu proudícího touto rychlostí je nezanedbatelný. Teplota v okolí netěsných spár se pohybovala okolo $10,2 - 8,3^\circ\text{C}$. Při těchto teplotách v obytných místnostech již dochází ke kondenzaci vodní páry a k růstu plísní okolo okenních otvorů. Je však nutné si uvědomit, že k tak velkému proudění za běžných podmínek

dochází pouze ojediněle v nárazech větru. Vznik kondenzátu v okolí těchto otvorů je tedy nepravděpodobný.

Měření za standardních tlakových rozdílů probíhalo pro většinu bodů bez problémů a to s použitím clony B. Ustálení tlakových diferencí na požadovaných hodnotách bylo ve srovnání s ostatními variantami snadnější. U hodnot tlakových rozdílů pod 35 Pa u podtlaku a 45 Pa u přetlaku, kdy byl ventilátor doplněn clonou C, bylo s touto clonou možné dosáhnout velmi přesného ustálení.

V průběhu testu s nízkými tlakovými rozdíly docházelo ke znatelnějším výkyvům měřených hodnot. Výrazněji se zde projevil vliv provozu v okolních prostorech. Oba testy této varianty měření probíhaly, až na jedinou výjimku, se clonou C. Při získávání hodnot pro nejnižší bod měření, tedy 5 Pa, byl ventilátor doplněn o clonu D.

Nejobtížnější získávání dat nastalo při měření 3. varianty testu s vysokými tlakovými rozdíly. Přesto jsou zde odchylky tlakových rozdílů nejmenší. V průběhu celého měření této varianty byl ventilátor osazen clonou B.

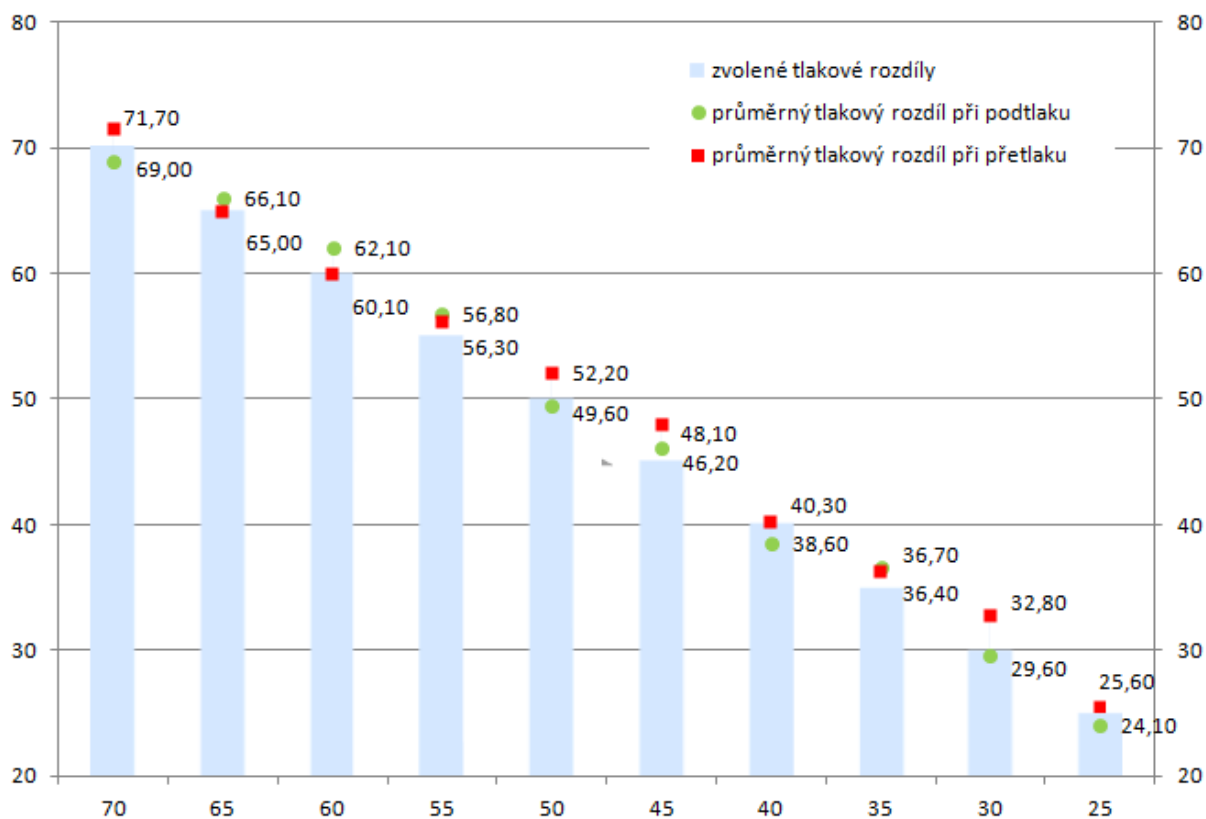
Hodnoty intenzit výměny vzduchu pro varianty měření 1 a 3 nabyly hodnot $1,44 \text{ h}^{-1}$. Pro variantu 2 je potom hodnota n_{50} rovna $1,41 \text{ h}^{-1}$.

Téměř ve všech případech jsou zaznamenány větší průtoky v režimu podtlaku. Zřejmě zde dochází k nasávání vzduchu přes okenní spáry, při podtlaku, kde je proudění usnadněno skutečností, že se okna otevírají směrem dovnitř a tudíž nejsou jejich spáry vyvolaným tlakovým rozdílem přitlačeny.

5.1.2 Vyhodnocení měření

Standardní tlakové rozdíly:

V grafu je znázorněn rozptyl naměřených bodů od zadaných tlakových rozdílů a to v rozsahu 0,8 - 4,9 % pro podtlak a 0 - 9,3 % pro přetlak. Odchylky lze pro toto měření považovat za malé. Rovněž rozdíl směrnic regresních přímek je zde minimální.



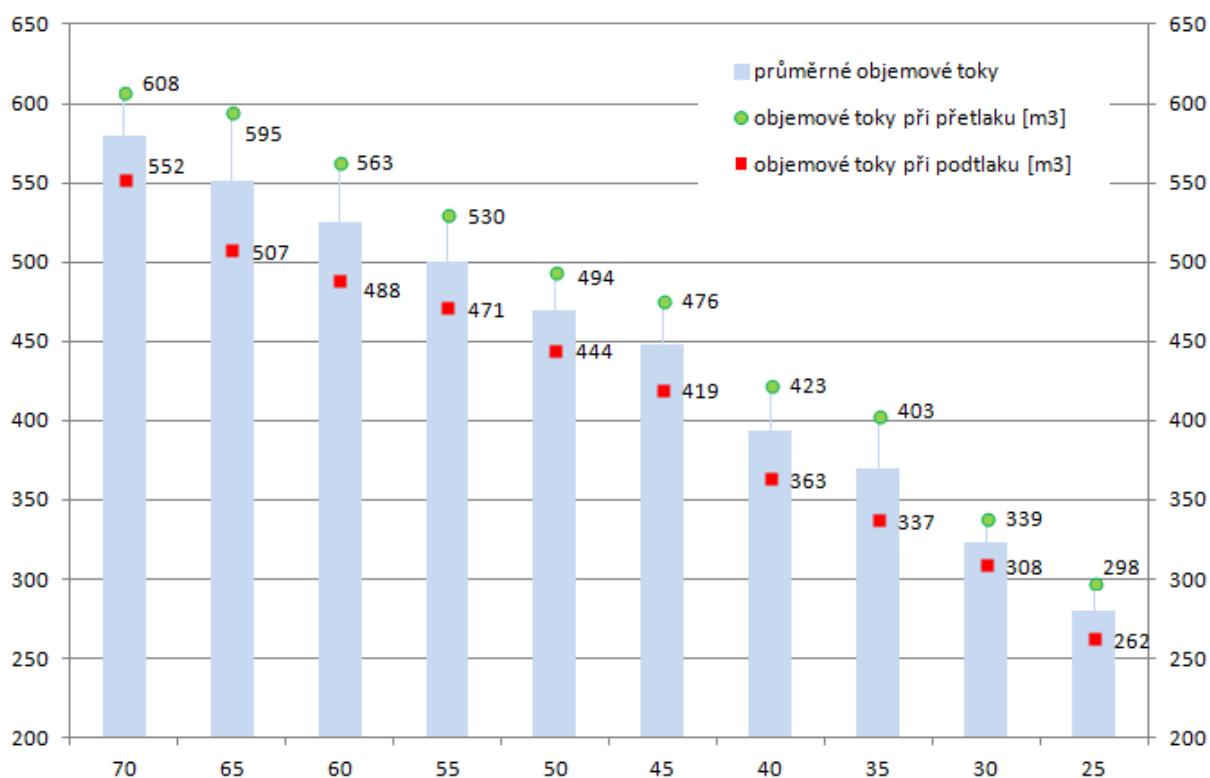
Obr. 18 Vyhodnocení standardních tlakových rozdílů v rozsahu 70-25 Pa

Tab. 3 Tlakové rozdíly s odchylkami naměřených hodnot

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [Pa]	odchylka %	Přetlak [Pa]	odchylka %
1	70	69,00	-1,43	71,70	2,43
2	65	66,10	1,69	65,00	0,00
3	60	62,10	3,50	60,10	0,17
4	55	56,80	3,27	56,30	2,36
5	50	49,60	-0,80	52,20	4,40
6	45	46,20	2,67	48,10	6,89
7	40	38,60	-3,50	40,30	0,75
8	35	36,70	4,86	36,40	4,00
9	30	29,60	-1,33	32,80	9,33
10	25	24,10	-3,60	25,60	2,40

Vyhodnocení průtoků vzduchu

Rozdíly v průtocích vzduchu obou tlakových variant nejsou příliš velké. Při klesajícím tlakovém rozdílu, pod 30 Pa, došlo také k výraznějšímu snížení rozdílů průtoků vzduchu. Při nižších tlakových rozdílech lze tedy zároveň očekávat nižší rozdíly v průtocích. Příčinou je samozřejmě snížení otáček ventilátoru s čímž zároveň souvisí snížení tlakového rozdílu.



Obr. 19 Graf vyhodnocení průtoků vzduchu

Tab. 4 Tabulka rozdílů průtoků vzduchu

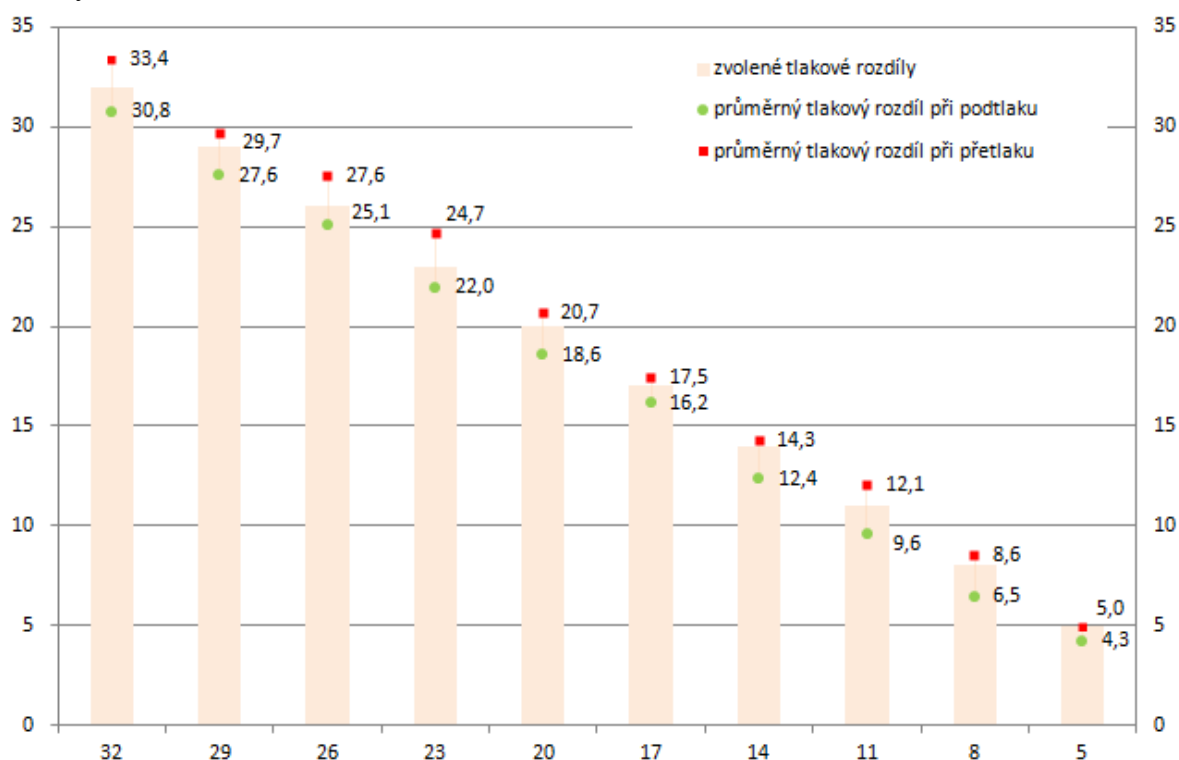
Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [m3/h]	Přetlak [m3/h]	Rozdíl [m3/h]
1	70	608	552	56
2	65	595	507	88
3	60	563	488	75
4	55	530	471	59
5	50	494	444	50
6	45	476	419	57
7	40	423	363	60
8	35	403	337	66
9	30	339	308	31
10	25	298	262	36

Nízké tlakové rozdíly:

Ačkoli nejsou odchylky z grafu na první pohled příliš patrné, jsou právě pro tuto variantu testu největší. Při sestupném měření po tlakový rozdíl 17 Pa nedocházelo k jejich výraznému růstu, avšak pod touto hodnotou jsou odchylky již výraznější a to zejména pro režim podtlaku. Avšak v případě záznamu dat okolo tlakového rozdílu 5 Pa za přetlaku je hodnota odchylky nulová. Měření v režimu přetlaku totiž probíhalo později, v době kdy provoz v okolních

prostorech ustal. Na přesnosti při tomto záznamu se podílela také clona D, již bylo nutné na vyzvání softwaru osadit. Pro podtlak bylo dosaženo největší odchylky 18,8%. V režimu přetlaku má největší odchylka hodnotu 10%.

Směrnice regresních přímek se zde pro každý z tlakových režimů liší, ve srovnání se zbylými variantami, poměrně výrazně, což může být ovlivněno rostoucími odchylkami u snižujících se tlakových rozdílů.



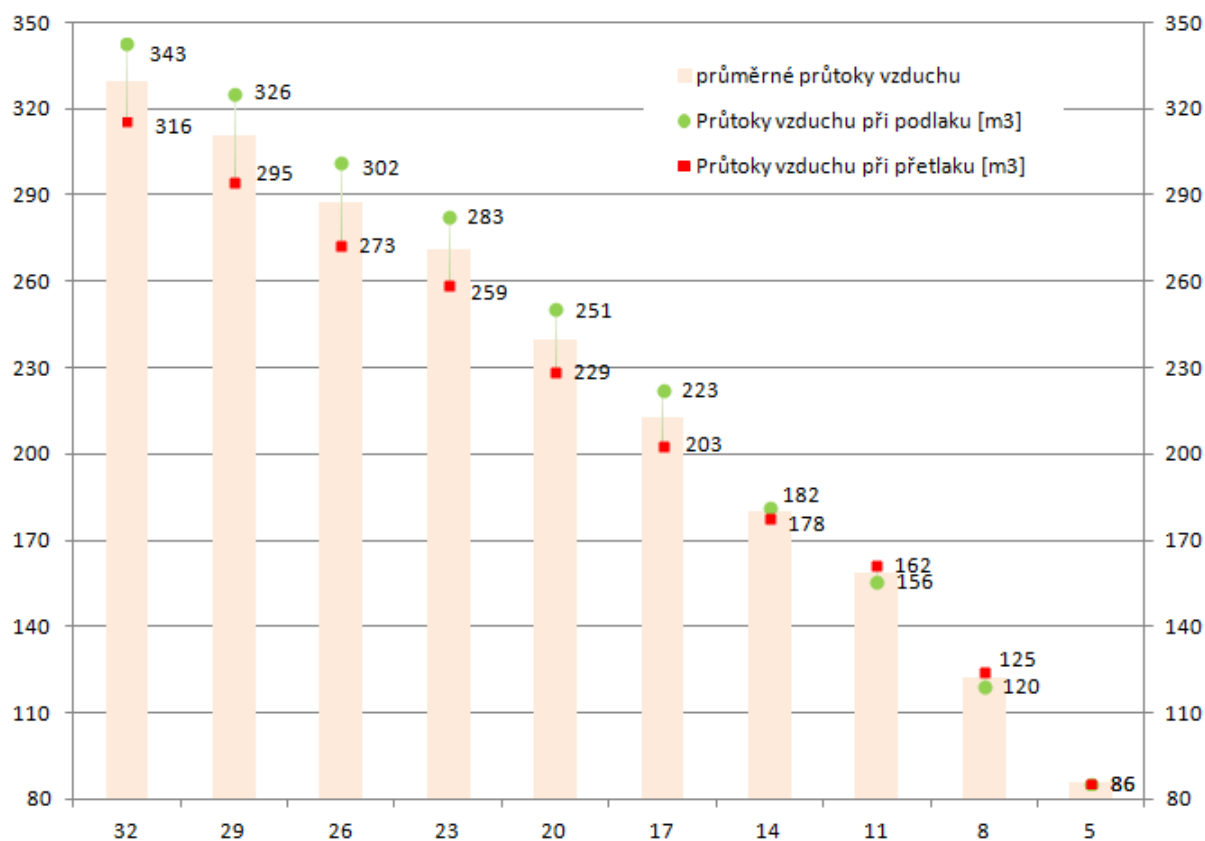
Obr. 20Vyhodnocení nízkých tlakových rozdílů v rozsahu 32-5 Pa

Tab. 5 Tlakové rozdíly s odchylkami naměřených hodnot

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [Pa]	odchylka %	Přetlak [Pa]	odchylka %
1	32	30,8	-3,75	33,4	4,38
2	29	27,6	-4,83	29,7	2,41
3	26	25,1	-3,46	27,6	6,15
4	23	22,0	-4,35	24,7	7,39
5	20	18,6	-7,00	20,7	3,50
6	17	16,2	-4,71	17,5	2,94
7	14	12,4	-11,43	14,3	2,14
8	11	9,6	-12,73	12,1	10,00
9	8	6,5	-18,75	8,6	7,50
10	5	4,3	-14,00	5,0	0,00

Vyhodnocení průtoků vzduchu

Pro tuto variantu měření jsou rozdíly objemových průtoků nejmenší, což je znázorněno na následujícím grafu a v tabulce.



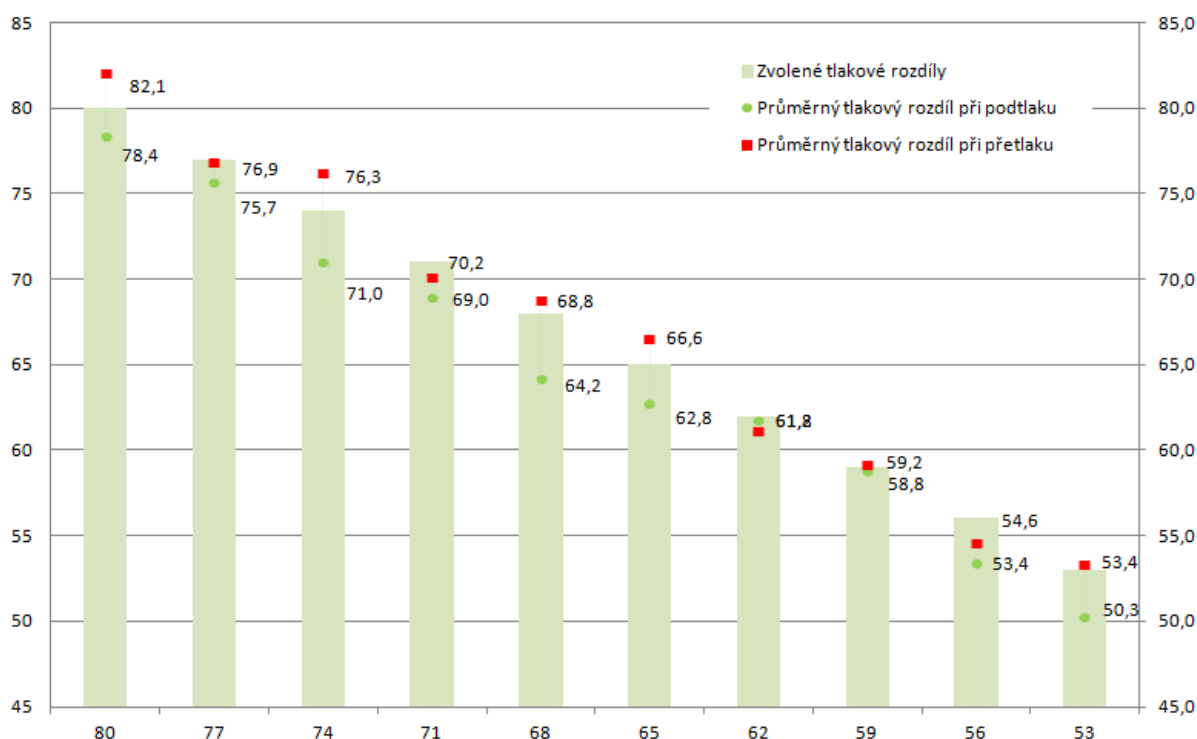
Obr. 21 Graf vyhodnocení průtoků vzduchu

Tab. 6 Tabulka rozdílů průtoků vzduchu

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [m3/h]	Přetlak [m3/h]	Rozdíl [m3/h]
1	32	343	316	27,00
2	29	326	295	31,00
3	26	302	273	29,00
4	23	283	259	24,00
5	20	251	229	22,00
6	17	223	203	20,00
7	14	182	178	4,00
8	11	156	162	6,00
9	8	120	125	5,00
10	5	86	86	0,00

Vysoké tlakové rozdíly:

Pro variantu vysokých tlakových rozdílů jsou odchylky naměřených bodů nejnižší. Výsledky varianty 3 jsou pro tento testovaný objekt a dle tohoto hodnocení nejpřesnější. Hodnoty tlakových rozdílů nižší než 60Pa bylo daleko snadnější udržet na požadovaných hodnotách než v případě vyšších tlakových rozdílů. Pouze u posledního bodu měření za podtlaku došlo k většímu odchýlení zřejmě z důvodu provozu na chodbě. Směrnice regresních přímkou obou režimů nabývají téměř stejných hodnot. Reakce místnosti na různé tlakové režimy je tedy shodná.



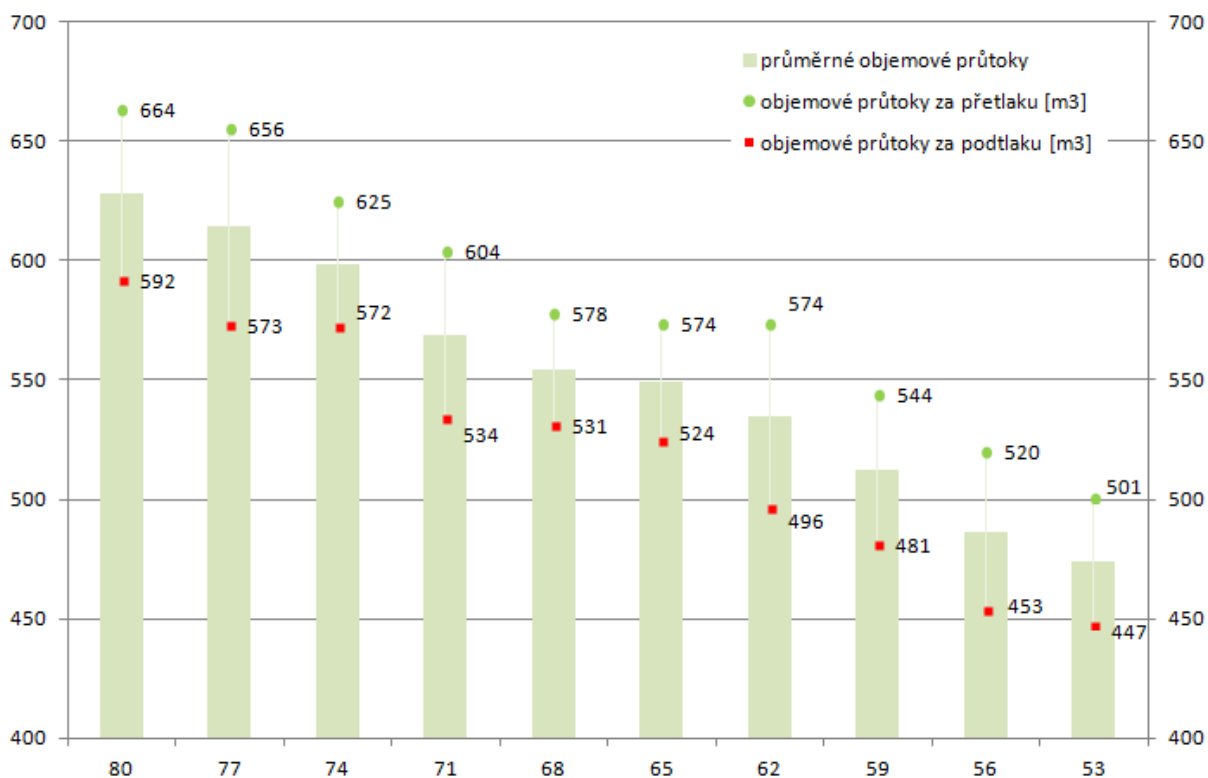
Obr. 22 Vyhodnocení nízkých tlakových rozdílů v rozsahu 80-53 Pa

Tab. 7 Tlakové rozdíly s odchylkami naměřených hodnot

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [Pa]	odchylka %	Přetlak [Pa]	odchylka %
1	80	78,4	-2,00	82,1	2,62
2	77	75,7	-1,69	76,9	-0,13
3	74	71,0	-4,05	76,3	3,11
4	71	69,0	-2,82	70,2	-1,13
5	68	64,2	-5,59	68,8	1,18
6	65	62,8	-3,38	66,6	2,46
7	62	61,8	-0,32	61,2	-1,29
8	59	58,8	-0,34	59,2	0,34
9	56	53,4	-4,64	54,6	-2,50
10	53	50,3	-5,09	53,4	0,75

Vyhodnocení průtoků vzduchu

Rozdíly v průtocích vzduchu tlakových režimů jsou zde srovnatelné s rozdíly vznikajícími při standardních tlakových diferencích. Se zvyšujícími se tlakovými rozdíly rostou objemové průtoky a s nimi také jejich rozdíly.



Obr. 23 Graf vyhodnocení průtoků vzduchu

Tab. 8 Tabulka rozdílů průtoků vzduchu

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [m3/h]	Přetlak [m3/h]	Rozdíl [m3/h]
1	80	664	592	72,00
2	77	656	573	83,00
3	74	625	572	53,00
4	71	604	534	70,00
5	68	578	531	47,00
6	65	574	524	50,00
7	62	574	496	78,00
8	59	544	481	63,00
9	56	520	453	67,00
10	53	501	447	54,00

5.2 Experimentální objekt č.2: Rodinný dům U hájenky, Moravské Knínice

5.2.1 Průběh testu

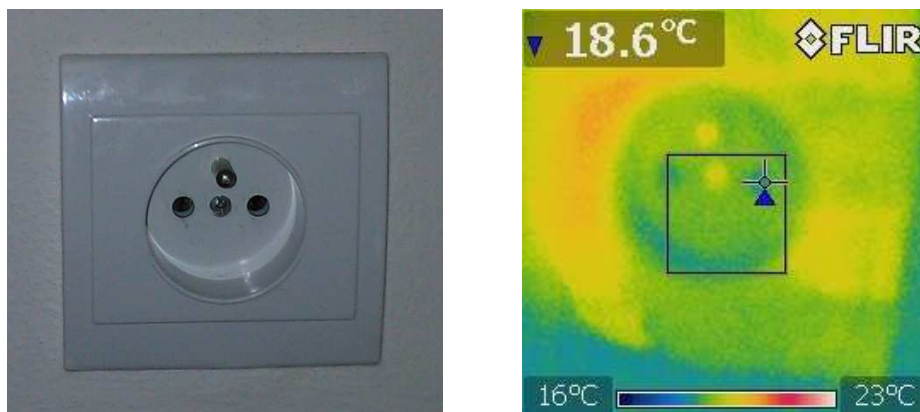
Nejprve byl proveden test v režimu podtlaku a to pro variantu měření č. 1 při standardních tlacích se clonou A, kterou bylo nutné doplnit, po upozornění softwaru, clonou B. Po provedení dalších dvou variant měření byl ventilátor otočen a proběhlo stejným způsobem měření při přetlaku.

Při měření za nízkých tlakových rozdílů, tedy varianta 2, byla použita clona B pouze pro záznam dat okolo hodnoty tlakového rozdílu 5 Pa bylo nutné použít clonu C s menším otvorem.

Během tohoto testu bylo pozorováno výrazné kolísání tlakových rozdílů z důvodu měnících se povětrnostních podmínek. Rostla chyba a intenzita výměny vzduchu.

V průběhu měření varianty 3, tj. měření při vyšších tlakových rozdílech, byla clona A při tlakovém rozdílu menším než 60 Pa při podtlaku a 52 Pa při přetlaku doplněna clonou B. Jak se dalo předpokládat, hodnoty intenzity výměny vzduchu byly vyšší než průměrné hodnoty při ostatních měřeních.

Během všech variant testů bylo kontrolováno, zda nedošlo k porušení těsnění dříve zapečetěných netěsností otvorů. Dále proběhlo odhalování netěsností v obálce budovy s použitím metody přiložení holé dlaně a snímkování termokamerou. Při režimu podtlaku bylo v místě elektrických zásuvek zřetelně citelné proudění vzduchu.

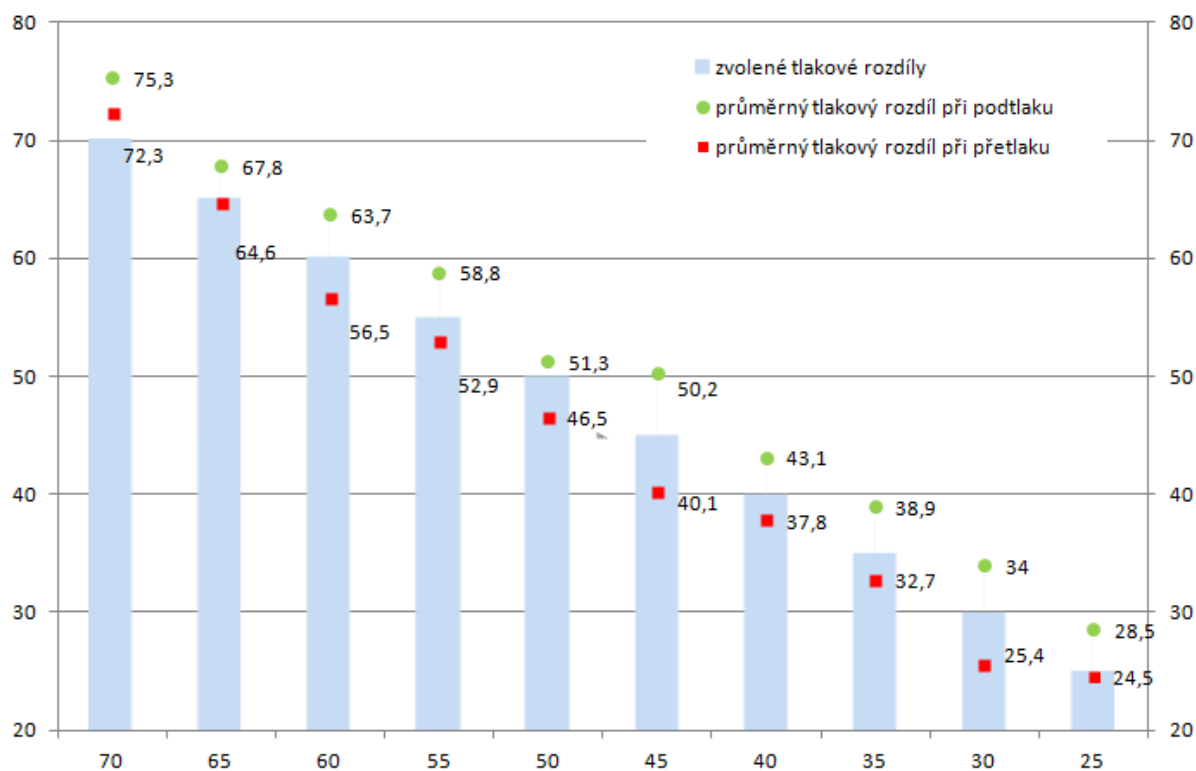


Obr. 24 Termosnímek znázorňující povrchovou teplotu sníženou vlivem proudícího vzduchu netěsnými rozvody elektroinstalací. [archív autora diplomové práce]

5.2.2 Vyhodnocení měření

Standardní tlakové rozdíly:

Graf ukazuje rozptyl naměřených bodů od zadaných tlakových rozdílů v rozsahu 2,6 – 14% při podtlaku a 0,6 - 15% při přetlaku. K většímu rozptylu hodnot tedy došlo při měření za přetlaku. Výsledná regresní přímka má oproti měření v režimu podtlaku strmější průběh, což může poukazovat na proudění vzduchu většími netěsnostmi.



Obr. 25 Vyhodnocení standardních tlakových rozdílů v rozsahu 70-25 Pa

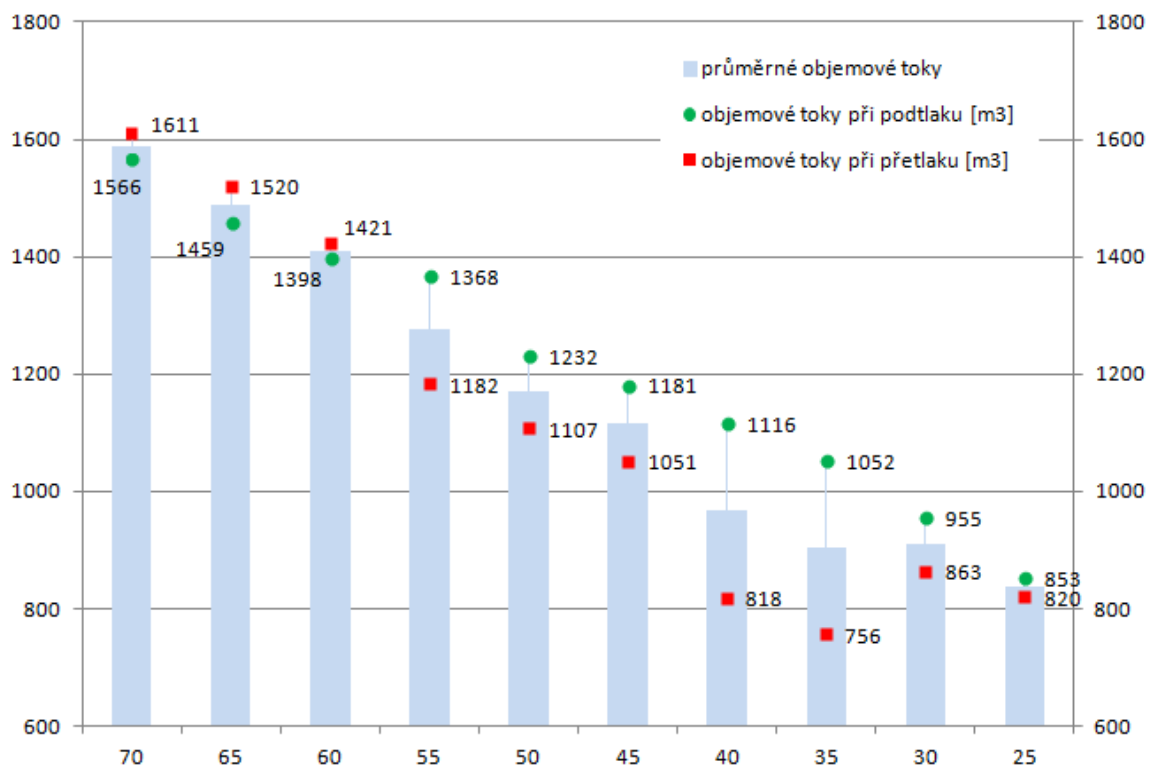
Tab. 9 Tlakové rozdíly s odchylkami naměřených hodnot

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [Pa]	odchylka %	Přetlak [Pa]	odchylka %
1	70	75,3	7,57	72,3	3,29
2	65	67,8	4,31	64,6	-0,62
3	60	63,7	6,17	56,5	-5,83
4	55	58,8	6,91	52,9	-3,82
5	50	51,3	2,60	46,5	-7,00
6	45	50,2	11,56	40,1	-10,89
7	40	43,1	7,75	37,8	-5,50
8	35	38,9	11,14	32,7	-6,57
9	30	34	13,33	25,4	-15,33
10	25	28,5	14,00	24,5	-2,00

Vyhodnocení průtoků vzduchu

Rozdíly průtoků vzduchu se z počátku měření zdály být minimální, ovšem s poklesem tlakového rozdílu pod 60 Pa došlo k výraznějšímu rozdílu hodnot objemových průtoků.

Příčinou může být uvolnění lokálně netěsných spojů, které byly při vyšších tlakových diferencích utěsněny vyvolaným tlakem. Hodnoty jsou samozřejmě ovlivněny také povětrnostními podmínkami, jež jsou v tomto případě považovány za nepříznivé a dále také charakterem netěsností v obálce budovy.



Obr. 26 graf vyhodnocení průtoků vzduchu

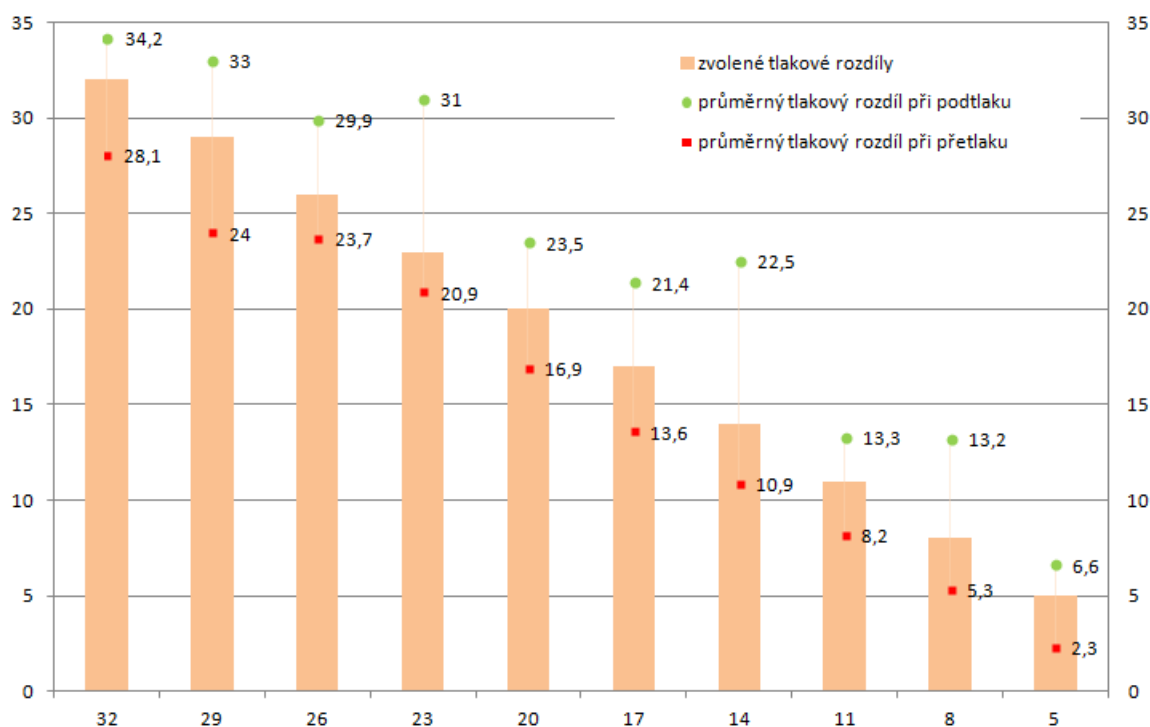
Naopak při snížení tlakového rozdílu na hodnotu okolo 30 Pa a níže, je opět vidět znatelné snížení rozdílů průtoků vzduchu obou tlakových režimů. Což je dáno snížením otáček ventilátoru a tím i snížením průtoků vzduchu.

Tab. 10 Tabulka rozdílů průtoků vzduchu

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [m3/h]	Přetlak [m3/h]	Rozdíl [m3/h]
1	70	1566	1611	45,00
2	65	1459	1520	61,00
3	60	1398	1421	23,00
4	55	1368	1182	186,00
5	50	1232	1107	125,00
6	45	1181	1051	130,00
7	40	1116	818	298,00
8	35	1052	756	296,00
9	30	955	863	92,00
10	25	853	820	33,00

Nízké tlakové rozdíly

Z grafu jsou patrné velké odchylky měření zejména při podtlaku, kdy maximální odchýlení průměru tlakových rozdílů od požadované hodnoty dosahuje až 65%. Při přetlaku bylo potom dosaženo odchýlení o 54%. Na rozdíl od zbylých dvou variant je výsledná intenzita výměny vzduchu větší v případě měření za přetlaku.



Obr. 27 Vyhodnocení nízkých tlakových rozdílů v rozsahu 32-5 Pa

K těmto výrazným výkyvům výsledných tlakových rozdílů došlo v důsledku měnících se rychlostí větru. Podle pozorování dosáhla rychlost větru dle Beaufortovy stupnice stupně 3, což odpovídá rychlosti proudění větru přibližně $3,4 - 5,4 \text{ m.s}^{-1}$. Při tomto stupni je normou ČSN EN 13 829 doporučeno měření přerušit a prohlásit za neplatné. Výsledky takto ovlivněných měření jsou však pro účely této diplomové práce žádoucí.

Tab. 11 Tlakové rozdíly s odchylkami naměřených hodnot

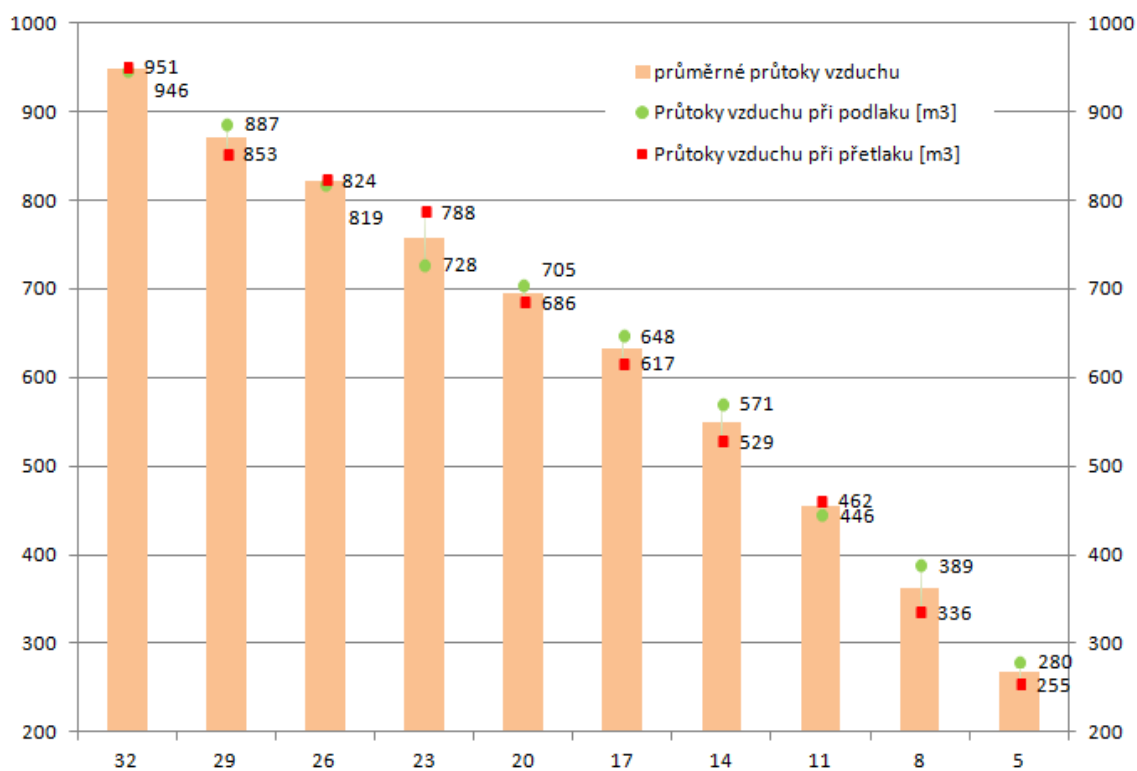
Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [Pa]	odchylka %	Přetlak [Pa]	odchylka %
1	32	34,2	6,88	28,1	-12,19
2	29	33	13,79	24	-17,24
3	26	29,9	15,00	23,7	-8,85
4	23	31	34,78	20,9	-9,13
5	20	23,5	17,50	16,9	-15,50
6	17	21,4	25,88	13,6	-20,00
7	14	22,5	60,71	10,9	-22,14
8	11	13,3	20,91	8,2	-25,45
9	8	13,2	65,00	5,3	-33,75
10	5	6,6	32,00	2,3	-54,00

Vyhodnocení průtoků vzduchu

Ve srovnání s ostatními variantami měření jsou rozdíly objemových průtoků pro tuto variantu měření nejmenší, což je samozřejmě ovlivněno opět nižšími otáčkami ventilátoru.

Tab. 12 Tabulka rozdílů průtoků vzduchu

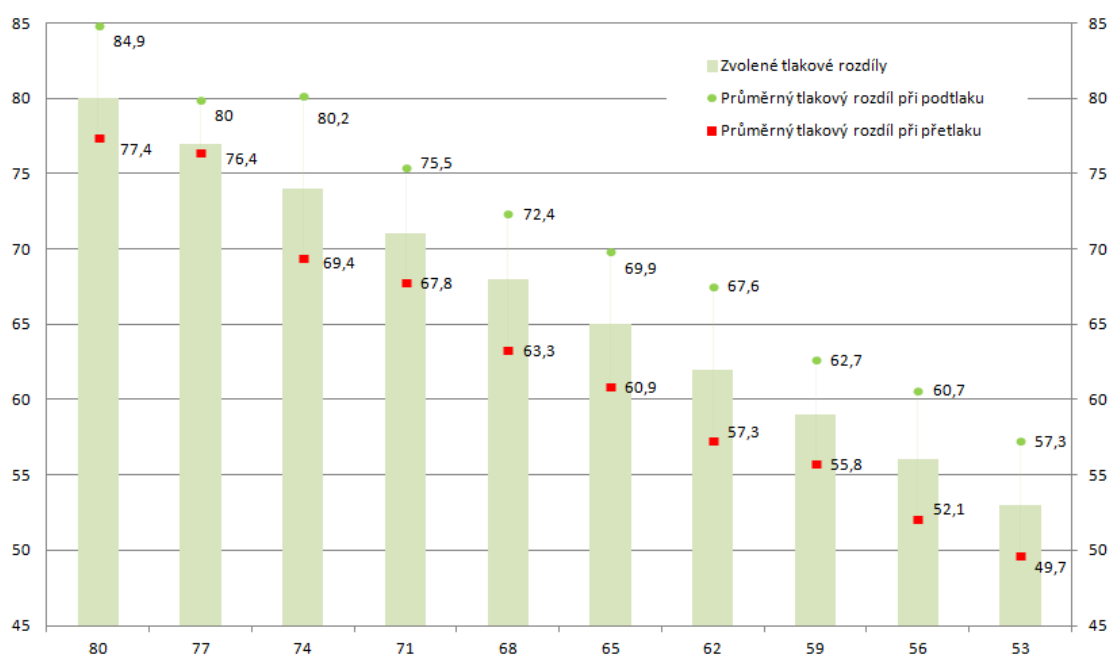
Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [m3/h]	Přetlak [m3/h]	Rozdíl [m3/h]
1	32	946	951	5,00
2	29	887	853	34,00
3	26	819	824	5,00
4	23	728	788	60,00
5	20	705	686	19,00
6	17	648	617	31,00
7	14	571	529	42,00
8	11	446	462	16,00
9	8	389	336	53,00
10	5	280	255	25,00



Obr. 28 graf vyhodnocení průtoků vzduchu

Vysoké tlakové rozdíly

Ve srovnání s předchozími variantami jsou rozdíly výsledných naměřených bodů podle očekávání nejnižší. Průměrná intenzita výměny vzduchu je nejvyšší. Výsledky této varianty je možné pro danou situaci považovat za nejpřesnější.



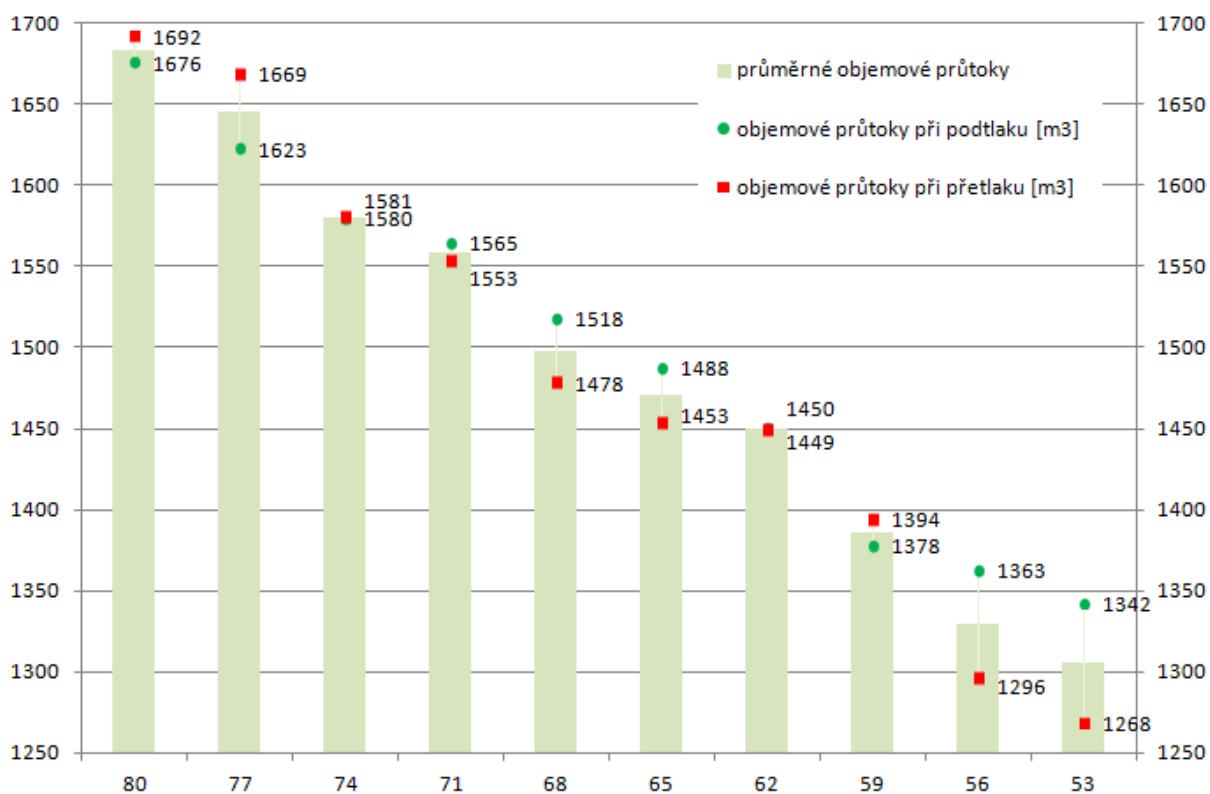
Obr. 29 Vyhodnocení vysokých tlakových rozdílů v rozsahu 80-53 Pa

Tab. 13 Tlakové rozdíly s odchylkami naměřených hodnot

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [Pa]	odchylka %	Přetlak [Pa]	odchylka %
1	80	84,9	6,13	77,4	-3,25
2	77	80	3,90	76,4	-0,78
3	74	80,2	8,38	69,4	-6,22
4	71	75,5	6,34	67,8	-4,51
5	68	72,4	6,47	63,3	-6,91
6	65	69,9	7,54	60,9	-6,31
7	62	67,6	9,03	57,3	-7,58
8	59	62,7	6,27	55,8	-5,42
9	56	60,7	8,39	52,1	-6,96
10	53	57,3	8,11	49,7	-6,23

Vyhodnocení průtoků vzduchu

Rozdíly průtoků vzduchu obou tlakových režimů jsou menší než u standardních tlakových rozdílů, i zde je vidět, že při poklesu tlakového rozdílu přibližně pod 59 Pa rostou rozdíly průtoků vzduchu obou tlakových režimů.



Obr. 30 graf vyhodnocení průtoků vzduchu

Tab. 14 Tabulka rozdílů průtoků vzduchu

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [m ³ /h]	Přetlak [m ³ /h]	Rozdíl [m ³ /h]
1	80	1676	1692	16,00
2	77	1623	1669	46,00
3	74	1580	1581	1,00
4	71	1565	1553	12,00
5	68	1518	1478	40,00
6	65	1488	1453	35,00
7	62	1450	1449	1,00
8	59	1378	1394	16,00
9	56	1363	1296	67,00
10	53	1342	1268	74,00

5.2.3 Shrnutí

Průměrná hodnota intenzity výměny vzduchu pro všechny varianty měření přesahuje hodnotu 2,0 h⁻¹. S touto hodnotou spadá měřený objekt dle ČSN 73 0540 do kategorie běžná výstavba. Vliv volby vstupních parametrů je patrný zejména při nízkých tlakových rozdílech v kombinaci s nepříznivými klimatickými podmínkami v podobě zvýšené rychlosti proudění větru. Důsledkem je získání horší hodnoty intenzity výměny vzduchu pro všechny varianty zvolených tlakových diferencí.

Při pohledu na grafy (z výstupu z měřicího softwaru) jsou patrné rozdíly směrnic výsledných regresních přímk, z čehož vyplývá odlišné chování objektu na různé tlakové režimy.

Při nízkých tlakových rozdílech by bylo možné získat dostatečně přesné výsledky měření pouze za ideálních podmínek, tedy za bezvětří, nízkého teplotního rozdílu a nejlépe při měření chráněného objektu v hustější okolní zástavbě či vegetaci.

5.3 Experimentální objekt č.3: Řadový rodinný dům, Veselská 1, Popůvky

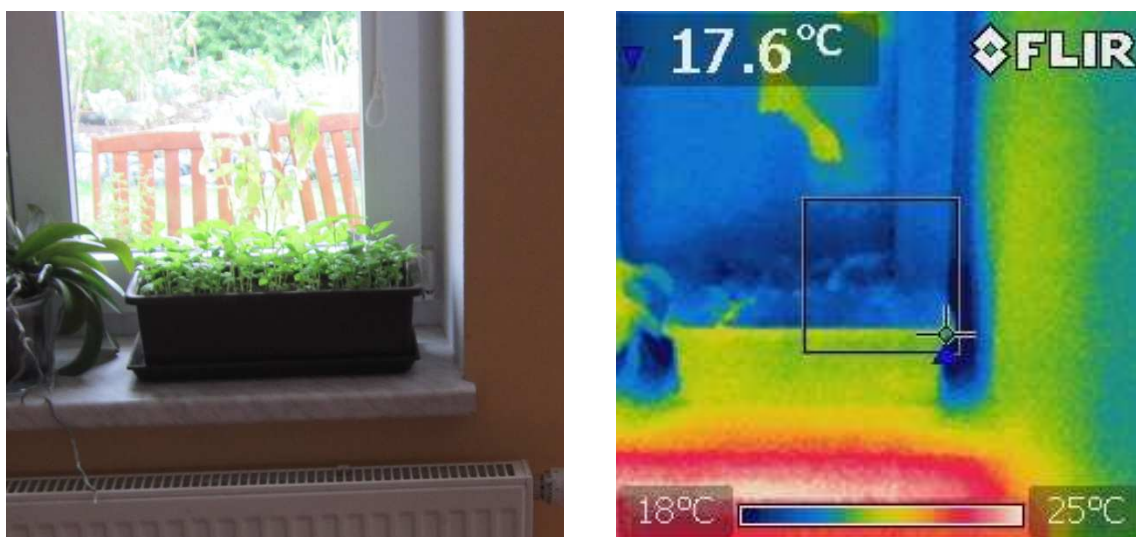
5.3.1 Průběh testu

Stejně jako v předchozím případě byl test proveden nejprve v režimu podtlaku pro všechny varianty tlakových rozdílů a následně v režimu přetlaku.

Téměř po celou dobu měření byl ventilátor osazen clonou B pouze pro případ udržení nízkých tlakových rozdílů, bylo třeba ventilátor doplnit clonou C.

Díky velmi příznivým klimatickým podmínkám a menšímu rozměru objektu bylo možné dosáhnout výrazně přesnějších výsledků než u předchozího měření.

Intenzita výměny vzduchu byla u všech variant měření téměř stejná s hodnotou $n_{50} = 2,1 \text{ h}^{-1}$. Větších hodnot intenzity výměny vzduchu bylo u všech variant dosahováno při přetlaku. Relativně vysoká hodnota celkové intenzity výměny vzduchu je pravděpodobně zapříčiněna přítomností krbových kamen v kombinaci s netěsnostmi nedoléhajících plastových oken případně profukováním spárami mezi rámem okna a parapetem. Rovněž i u tohoto objektu bylo detekováno proudění vzduchu elektrickými zásuvkami.



Obr. 31 Termosnímek znázorňující povrchovou teplotu sniženou vlivem proudícího vzduchu netěsnostmi spár okenního otvoru. [archív autora diplomové práce]

5.3.2 Vyhodnocení měření

Standardní tlakové rozdíly

Graf ukazuje rozptyl naměřených bodů od zadaných tlakových rozdílů v rozsahu 0 – 4,3% při podtlaku a 0,8 – 4,0% při přetlaku. Výsledky měření lze tedy považovat za velmi přesné.



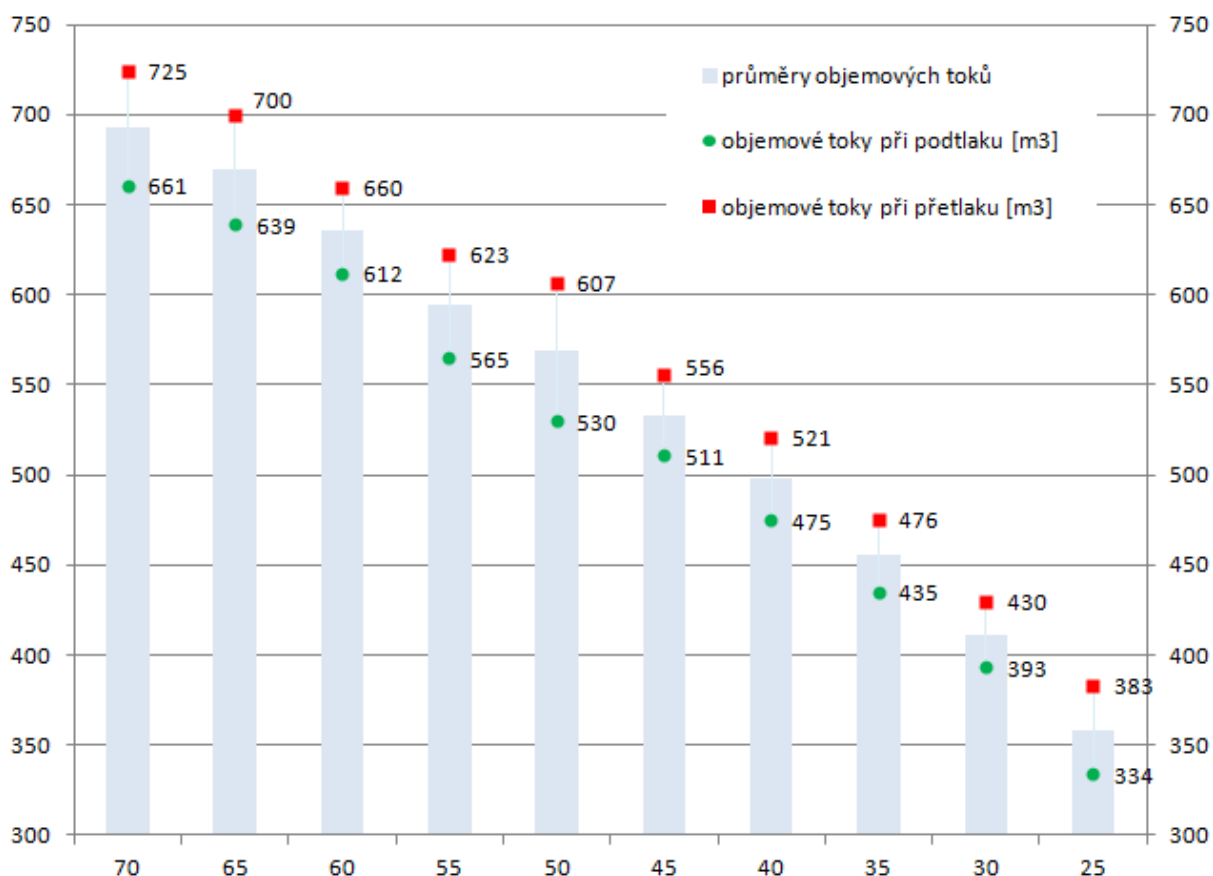
Obr. 32 Vyhodnocení standardních tlakových rozdílů v rozsahu 70-25 Pa

Tab. 15 Tlakové rozdíly s odchylkami naměřených hodnot

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [Pa]	odchylka %	Přetlak [Pa]	odchylka %
1	70	70,2	0,29	67,5	-3,57
2	65	66,6	2,46	64,3	-1,08
3	60	61,9	3,17	57,7	-3,83
4	55	54,9	-0,18	52,9	-3,82
5	50	50	0,00	50,6	1,20
6	45	46,5	3,33	44,4	-1,33
7	40	41,6	4,00	39,7	-0,75
8	35	36,5	4,29	34,6	-1,14
9	30	31,1	3,67	29,4	-2,00
10	25	25,7	2,80	24,6	-1,60

Vyhodnocení průtoků vzduchu

Rozdíl objemových průtoků je téměř ve všech měřených bodech v tomto tlakovém režimu srovnatelný. Větší průtok za přetlaku je pravděpodobně dán snadnějším prostupem vzduchu přes obálku objektu v tomto tlakovém režimu.



Obr. 33 Graf vyhodnocení průtoků vzduchu

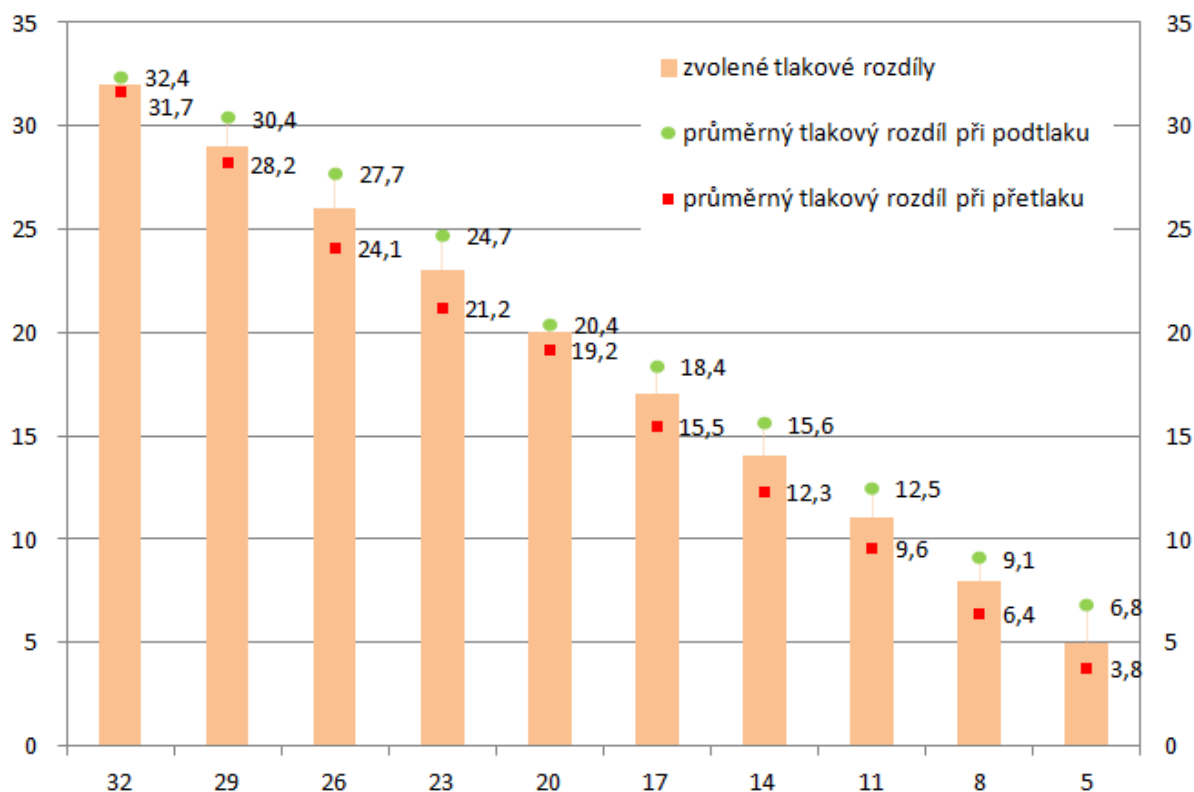
Tab. 16 Tabulka rozdílů průtoků vzduchu

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [m³/h]	Přetlak [m³/h]	Rozdíl [m³/h]
1	70	661	725	64,00
2	65	639	700	61,00
3	60	612	660	48,00
4	55	565	623	58,00
5	50	530	607	77,00
6	45	511	556	45,00
7	40	475	521	46,00
8	35	435	476	41,00
9	30	393	430	37,00
10	25	334	383	49,00

Nízké tlakové rozdíly

V případě nižších tlakových rozdílů lze z grafu vyčíst větší odchýlení získaných hodnot od zvolených tlakových diferencí, zejména při rozdílu tlaků pod 14 Pa.

Na druhou stranu je oproti předchozímu měření varianty 2, patrný téměř dvojnásobně nižší rozptyl hodnot výsledných tlakových rozdílů u každého jednotlivého bodu záznamu. Maximální odchýlení dosahuje 36% pro podtlak a 24% pro přetlak.



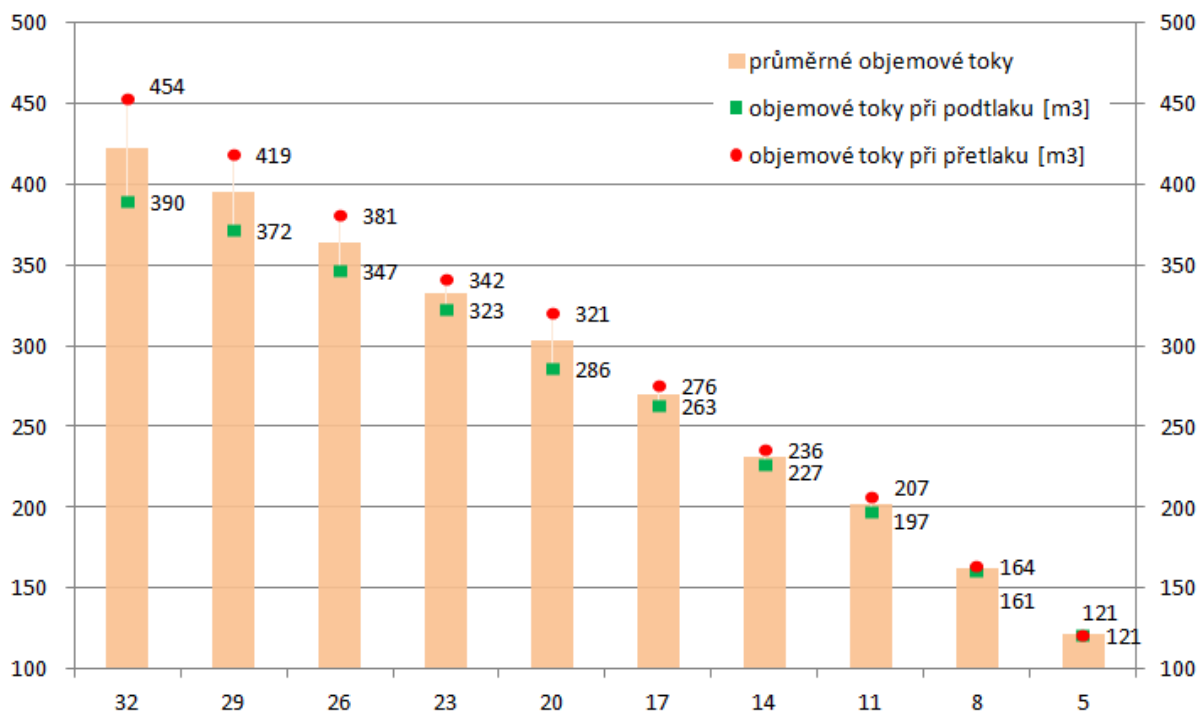
Obr. 34 Vyhodnocení nízkých tlakových rozdílů v rozsahu 32-5 Pa

Tab. 17 Tlakové rozdíly s odchylkami naměřených hodnot

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [Pa]	odchylka %	Přetlak [Pa]	odchylka %
1	32	32,4	1,25	31,7	-0,94
2	29	30,4	4,83	28,2	-2,76
3	26	27,7	6,54	24,1	-7,31
4	23	24,7	7,39	21,2	-7,83
5	20	20,4	2,00	19,2	-4,00
6	17	18,4	8,24	15,5	-8,82
7	14	15,6	11,43	12,3	-12,14
8	11	12,5	13,64	9,6	-12,73
9	8	9,1	13,75	6,4	-20,00
10	5	6,8	36,00	3,8	-24,00

Vyhodnocení průtoků vzduchu

V této variantě je rozdíl objemových průtoků z počátku srovnatelný s předchozí variantou měření ale po snížení tlakového rozdílu pod 26 Pa došlo zároveň ke snížení rozdílů průtoků, z čehož lze odvodit shodné chování objektu v obou tlakových režimech za nízkých tlakových rozdílů.



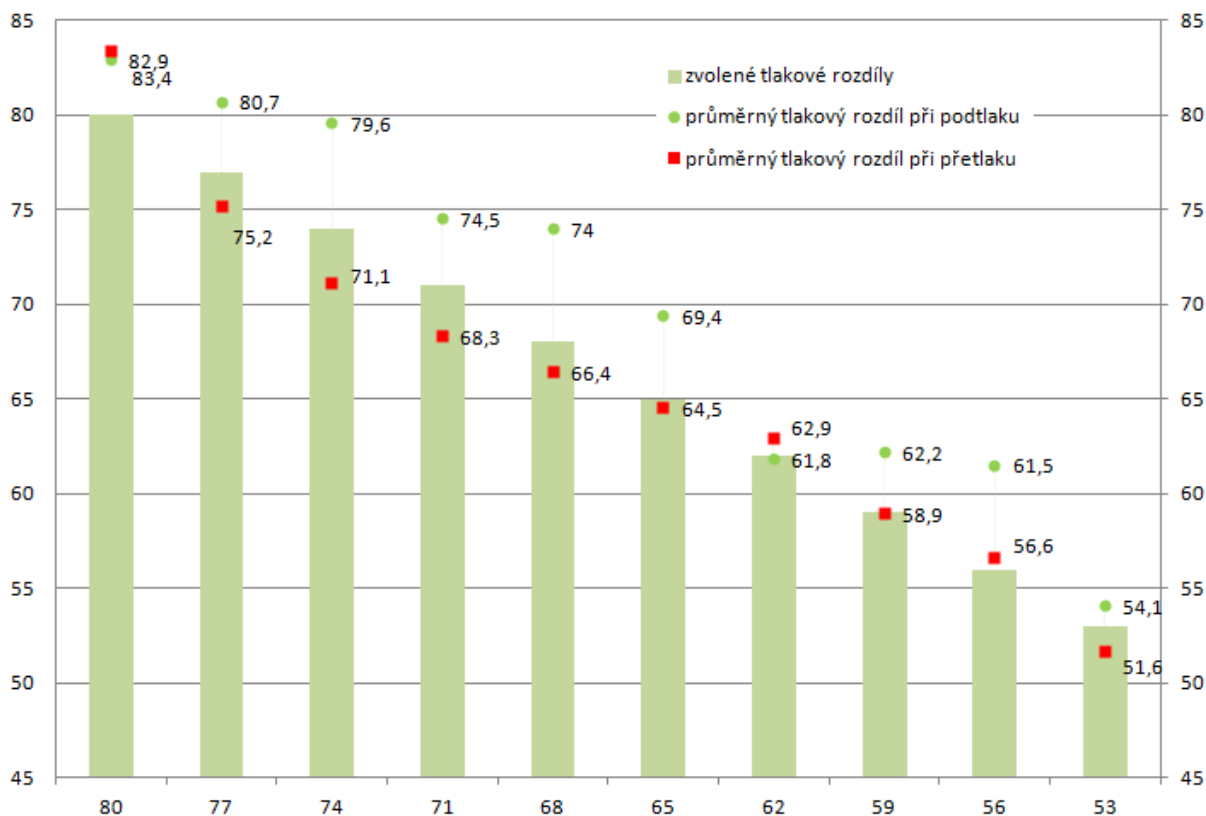
Obr. 35 Graf vyhodnocení průtoků vzduchu

Tab. 18 Tabulka rozdílů tlakových rozdílů

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [m³/h]	Přetlak [m³/h]	Rozdíl [m³/h]
1	32	390	454	64,00
2	29	372	419	47,00
3	26	347	381	34,00
4	23	323	342	19,00
5	20	286	321	35,00
6	17	263	276	13,00
7	14	227	236	9,00
8	11	197	207	10,00
9	8	161	164	3,00
10	5	121	121	0,00

Vysoké tlakové rozdíly

Při měření 3. varianty, postačila po celou dobu měření clona B. Výsledná hodnota intenzity výměny vzduchu byla stejná jako v případě měření se standardními tlakovými rozdíly. Ačkoli se při prvním pohledu na graf mohou odchylky jevit jako výrazné, nejsou při vyšších tlakových rozdílech příliš velké, což dokazují hodnoty v tabulce pod grafem.



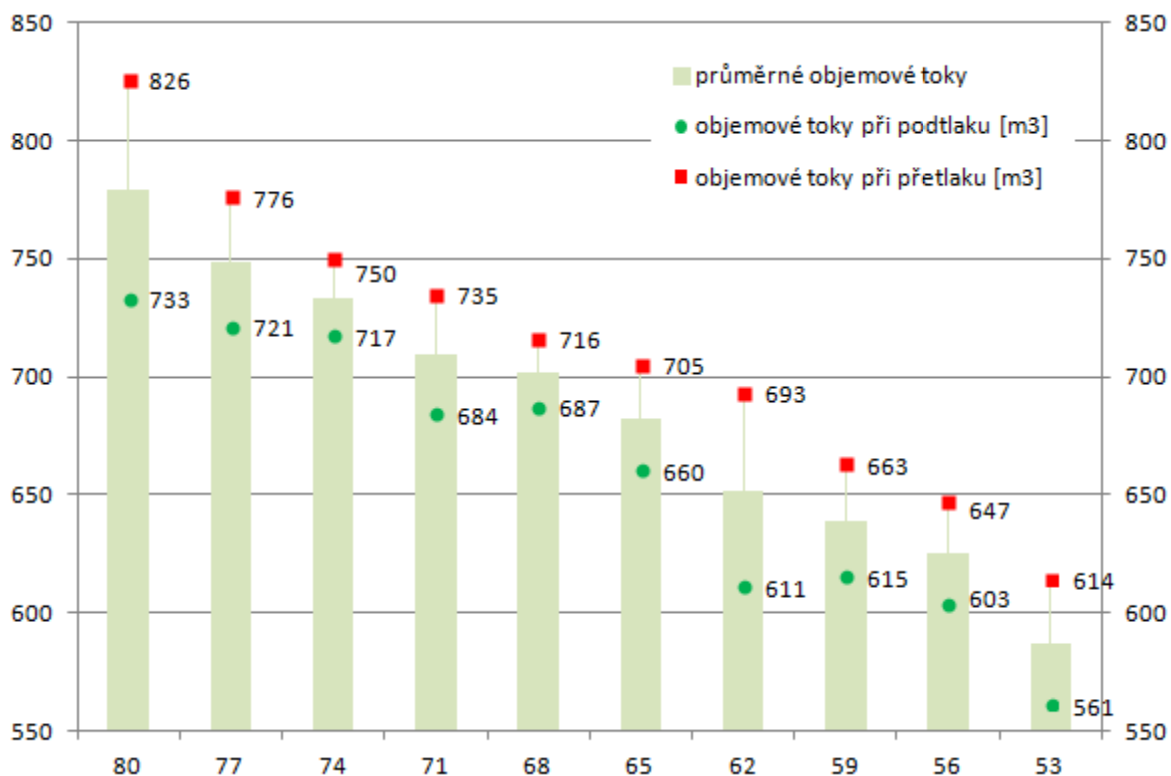
Obr. 36 Vyhodnocení vysokých tlakových rozdílů v rozsahu 80-53 Pa

Tab. 19 Tlakové rozdíly s odchylkami naměřených hodnot

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [Pa]	odchylka %	Přetlak [Pa]	odchylka %
1	80	82,9	3,63	83,4	4,25
2	77	80,7	4,81	75,2	-2,34
3	74	79,6	7,57	71,1	-3,92
4	71	74,5	4,93	68,3	-3,80
5	68	74	8,82	66,4	-2,35
6	65	69,4	6,77	64,5	-0,77
7	62	61,8	-0,32	62,9	1,45
8	59	62,2	5,42	58,9	-0,17
9	56	61,5	9,82	56,6	1,07
10	53	54,1	2,08	51,6	-2,64

Vyhodnocení průtoků vzduchu

Zde jsou rozdíly průtoků pochopitelně větší vlivem vyvolaného vyššího tlakového rozdílu a projevu odlišného chování objektu za těchto tlakových podmínek. Pro tento objekt tedy platí, že při rostoucím tlakovém rozdílu rostou i rozdíly průtoků vzduchu a s tím spojeny projevy odlišného chování obálky budovy na různé tlakové režimy.



Obr. 37 Graf vyhodnocení průtoků vzduchu

Tab. 20 Tabulka rozdílů průtoků vzduchu

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [m3/h]	Přetlak [m3/h]	Rozdíl [m³/h]
1	80	733	826	93,00
2	77	721	776	55,00
3	74	717	750	33,00
4	71	684	735	51,00
5	68	687	716	29,00
6	65	660	705	45,00
7	62	611	693	82,00
8	59	615	663	48,00
9	56	603	647	44,00
10	53	561	614	53,00

5.3.3 Shrnutí

Během všech variant měření bylo dosaženo výsledků s velmi malou odchylkou. Hodnota intenzity výměny vzduchu při nízkých tlakových rozdílech vyšla „nejhůře“, což je dáno tím, že hodnota n_{50} je vypočtena z dat získaných právě při této variantě a proto je možné na tuto hodnotu pohlížet jako na zkreslenou.

Překvapivé však je, že se zde n_{50} liší, od zbylých dvou variant, pouze o dvě setiny. Z této skutečnosti vyplývá, že za vhodných klimatických podmínek může být dosaženo stejných výsledků i při měření s různými tlakovými diferencemi.

Hodnoty exponentů proudění jsou u jednotlivých měření téměř stejné. Regresní přímky jednotlivých variant měření probíhají také téměř shodně z čehož lze usuzovat, že objekt reaguje na oba tlakové režimy (podtlak a přetlak) stejně.

5.4 Experimentální objekt č.4: Experimentální objekt VUT, Kulkova 10, Brno

5.4.1 Průběh testu

Jelikož nejsou jednotlivá podlaží vzájemně propojena. Probíhalo měření pouze v jednom a to ve 2.NP. Ventilátor byl osazen do hlavních vstupních dveří. Testovaný prostor zahrnoval všechny 3 místnosti 2.NP.

V prostoru se nacházelo určité množství stavebního materiálu, krabic, pracovních pomůcek a vybavení. Stavební neurčitost tak byla vyjádřena hodnotou 5%. Instalační otvor spojující obě podlaží byl utěsněn nafukovacím balónkem.



Obr. 38 Ucpávka instalačního otvoru

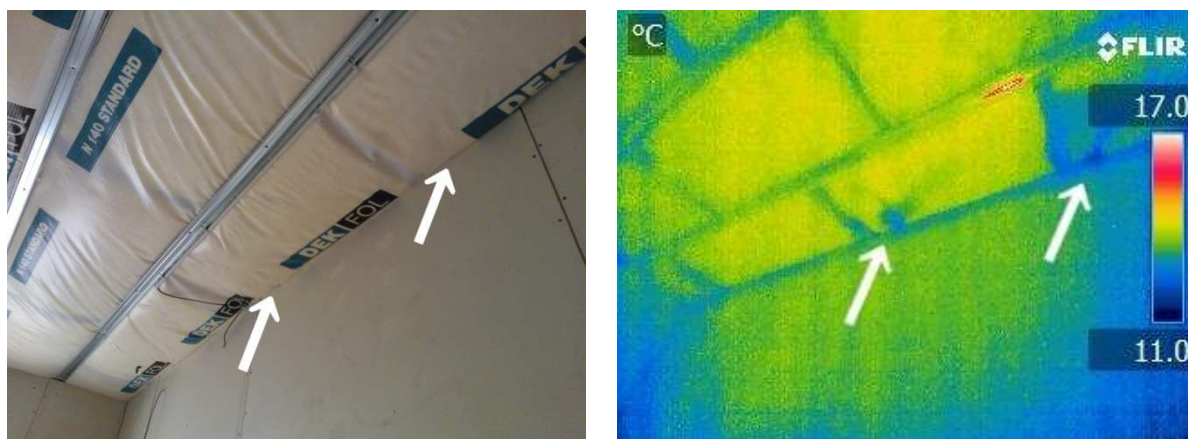
Test byl opět proveden pro všechny varianty tlakových rozdílů nejprve v režimu podtlaku a následně v režimu přetlaku. Navzdory tomu, že měření probíhalo na podzim, kdy bývají rozdíly teplot mezi vytápěným interiérem a chladným exteriérem výraznější než v létě, byly u tohoto testovaného prostoru teplotní rozdíly malé. Důvodem je absence vytápění, jež vzhledem k účelu této budovy není nutné.

Pro udržení požadovaného tlakového rozdílu v případě malého testovaného prostoru, bylo při měření s nízkými tlakovými rozdíly nutné doplňování clon menších rozměrů a to konkrétně clon C až E při podtlaku a B až E při přetlaku. Při měření se standardními tlakovými rozdíly postačila pro oba režimy testů clona C po celou dobu měření. Měření za vyšších tlakových rozdílů probíhalo se clonou C. Pouze při překročení tlakového rozdílu 75 Pa bylo po upozornění měřicím softwarem nutné použít clonu B.

Při měření v režimu přetlaku došlo při sběru dat k výraznému odchýlení od přednastaveného tlakového rozdílu, což bude popsáno dále.

Tak jako předchozí měření, probíhalo i toto za velmi příznivých povětrnostních podmínek. Výsledky je možné považovat za velmi přesné. Přesnost výsledků je také v tomto případě ovlivněna malými rozměry testovaného objektu.

Při snímkováním termokamerou za podtlaku byly v testovaném prostoru detekovány lokální netěsnosti v místech styku parotěsné fólie u stropu s obložení obvodových stěn a dále v prostupech kabelů vzduchotěsnicí vrstvou. Utěsnění oken je možno považovat za dokonalé.

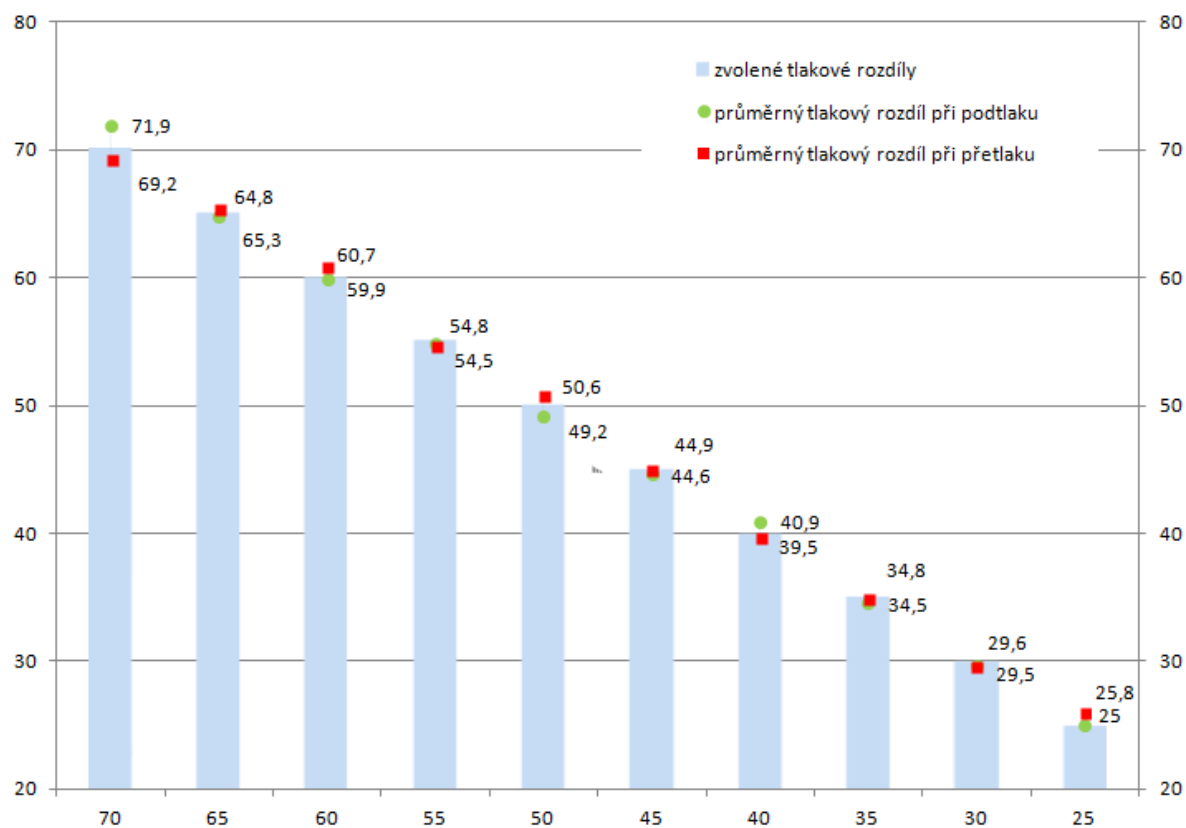


Obr. 39 Místa netěsností v nedostatečně provedeném napojení parozábrany na obvodovou stěnu a utěsnění prostupu kabelů přes vzduchotěsnou vrstvu. Na první pohled nejsou nedokonalosti patrné (vlevo), na termo snímku je zřetelně viditelné snížení teploty vlivem proudění chladnějšího vzduchu z exteriéru při podtlaku (vpravo)

5.4.2 Vyhodnocení měření

Standardní tlakové rozdíly

Z grafu je patrný velmi malý rozptyl získaných hodnot. Naměřené hodnoty se liší oproti zadaným tlakovým rozdílům v rozsahu 0 – 2,7% při podtlaku a 0,2 – 3,2% při přetlaku. Výsledky tohoto měření jsou nejpřesnější.



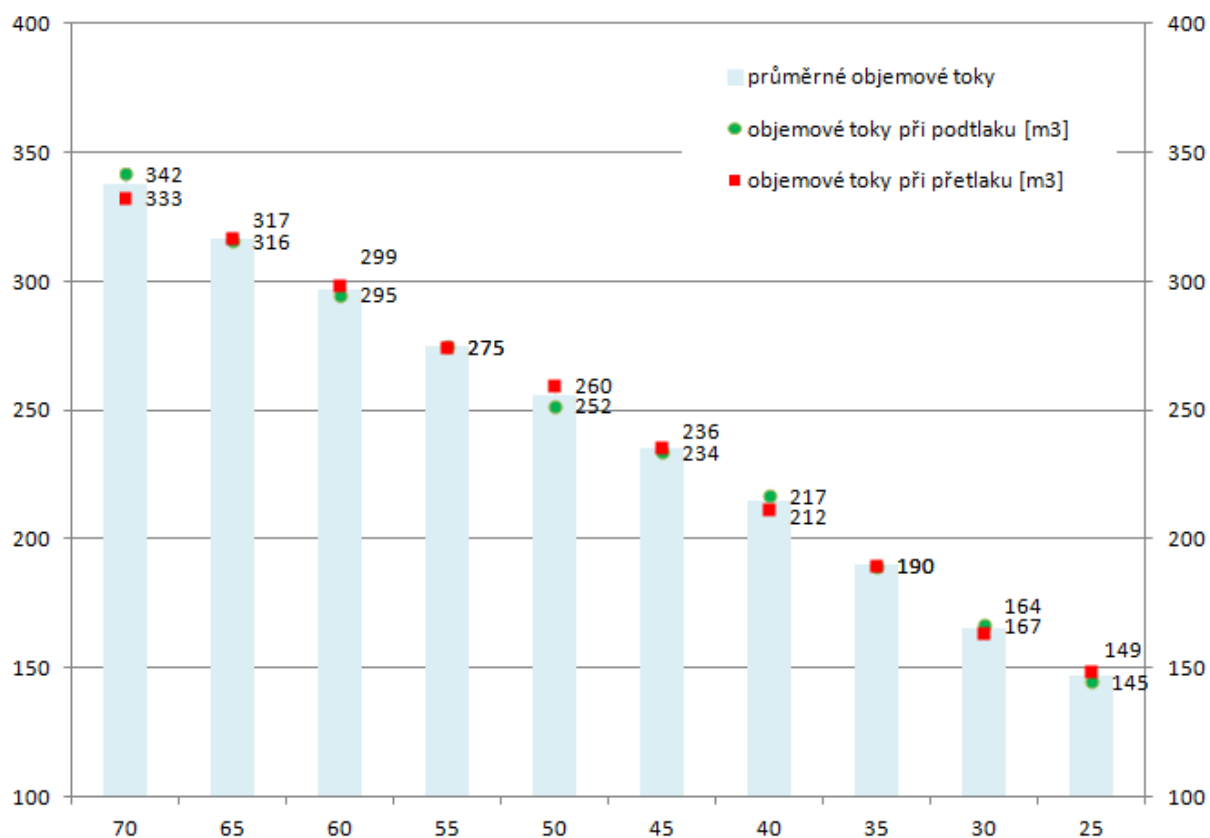
Obr. 40 Vyhodnocení standardních tlakových rozdílů 70-25 Pa

Tab. 21 Tlakové rozdíly s odchylkami naměřených hodnot

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [Pa]	odchylka %	Přetlak [Pa]	odchylka %
1	70	71,9	2,71	69,2	-1,14
2	65	64,8	-0,31	65,3	0,46
3	60	59,9	-0,17	60,7	1,17
4	55	54,8	-0,36	54,5	-0,91
5	50	49,2	-1,60	50,6	1,20
6	45	44,6	-0,89	44,9	-0,22
7	40	40,9	2,25	39,5	-1,25
8	35	34,5	-1,43	34,8	-0,57
9	30	29,6	-1,33	29,5	-1,67
10	25	25	0,00	25,8	3,20

Vyhodnocení průtoků vzduchu

Rozdíly objemových průtoků jsou pro tuto variantu a testovaný objekt velmi malé. Chování obálky je v obou režimech při standardním tlakovém rozmezí stejné.



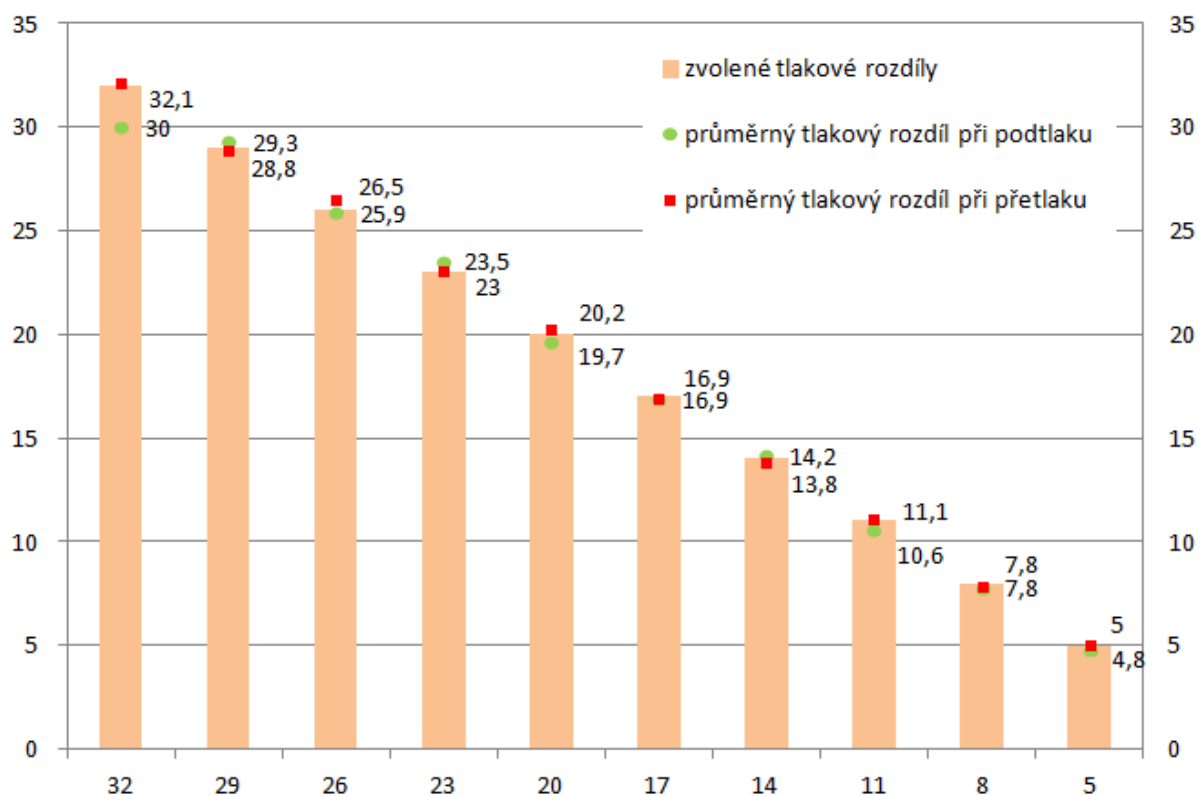
Obr. 41 Graf vyhodnocení průtoků vzduchu

Tab. 22 Tabulka rozdílů průtoků vzduchu

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [m³/h]	Přetlak [m³/h]	Rozdíl [m³/h]
1	70	342	333	9,00
2	65	316	317	1,00
3	60	295	299	4,00
4	55	275	275	0,00
5	50	252	260	8,00
6	45	234	236	2,00
7	40	217	212	5,00
8	35	190	190	0,00
9	30	167	164	3,00
10	25	145	149	4,00

Nízké tlakové rozdíly

Vyhodnocením dat získaných při měření za nižších tlakových rozdílů, byl vytvořen graf znázorňující, podobně jako v předchozí variantě měření, velmi malé odchýlení získaných hodnot od zvolených tlakových diferencí. Maximální rozdíl naměřených hodnot dosáhl 6,25% při podtlak a 2,5% pro přetlak.



Obr. 42 Vyhodnocení nízkých tlakových rozdílů 32-5 Pa

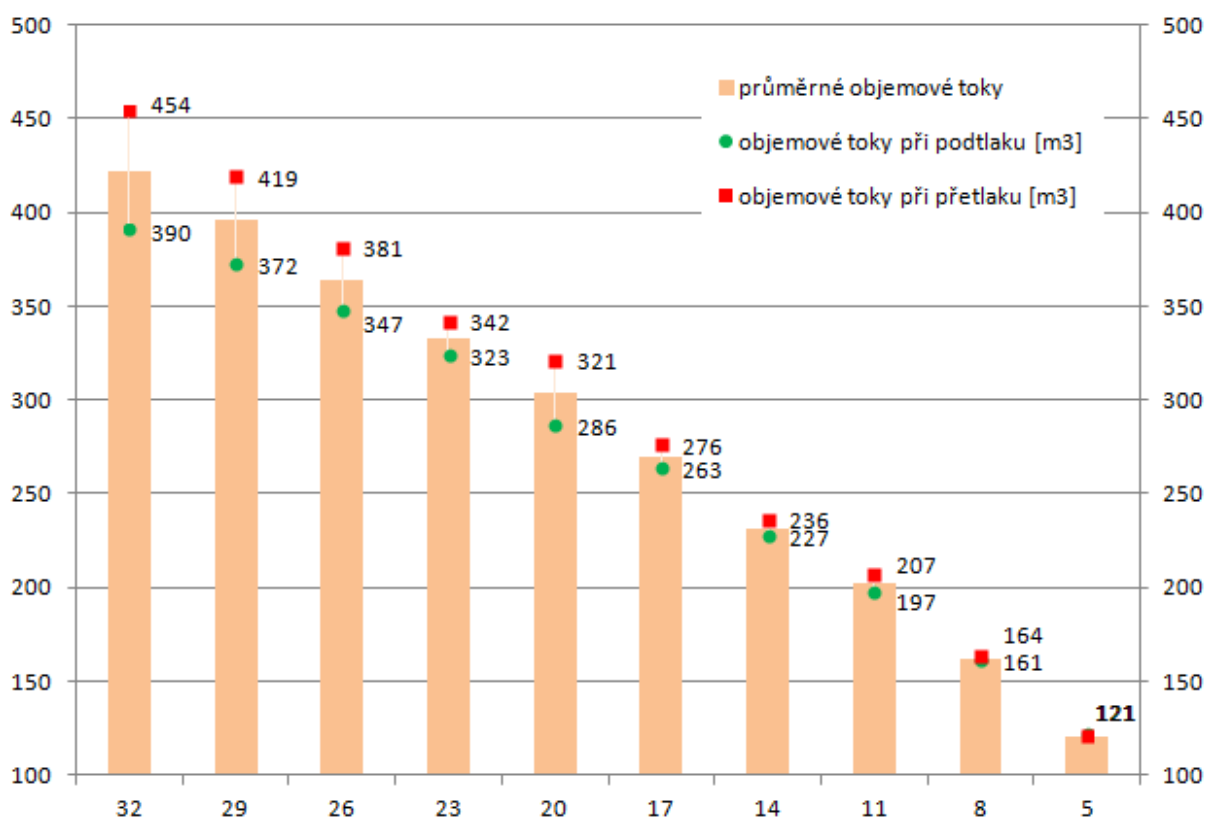
Tab. 23 Tlakové rozdíly s odchylkami naměřených hodnot

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [Pa]	odchylka %	Přetlak [Pa]	odchylka %
1	32	30	-6,25	32,1	0,31
2	29	29,3	1,03	28,8	-0,69
3	26	25,9	-0,38	26,5	1,92
4	23	23,5	2,17	23	0,00
5	20	19,7	-1,50	20,2	1,00
6	17	16,9	-0,59	16,9	-0,59
7	14	14,2	1,43	13,8	-1,43
8	11	10,6	-3,64	11,1	0,91
9	8	7,8	-2,50	7,8	-2,50
10	5	4,8	-4,00	5	0,00

Vyhodnocení průtoků vzduchu

Přestože byly v této variantě měření vyvozeny menší tlakové rozdíly, objemové toky byly u tohoto měření vyšší než u varianty předchozí. Zatímco u předchozí varianty dosahovaly rozdíly objemových toků mezi tlakovými diferencemi 35 - 25 Pa velmi malých hodnot, zde až po hodnotu tlakového rozdílu okolo 17 Pa, byly rozdíly výrazně větší a to kvůli většímu průtoku vzduchu v režimu přetlaku. Až po snížení tlakových rozdílů pod 11 - 17 Pa je patrné snížení rozdílů v množství proudícího vzduchu.

Příčinou může být odlišné chování objektu během celého testu v této tlakové variantě, kdy vlivem pomalého nárůstu tlakového rozdílu pravděpodobně nedochází k výraznějšímu stlačení spojů vzduchotěsné vrstvy, čímž dojde k proudění většího množství vzduchu v obou tlakových režimech, výrazněji však v režimu přetlaku což může poukazovat na další vlastnosti vzduchotěsné vrstvy například vyšší plošná průvzdušnost OSB desek ze strany interiéru.



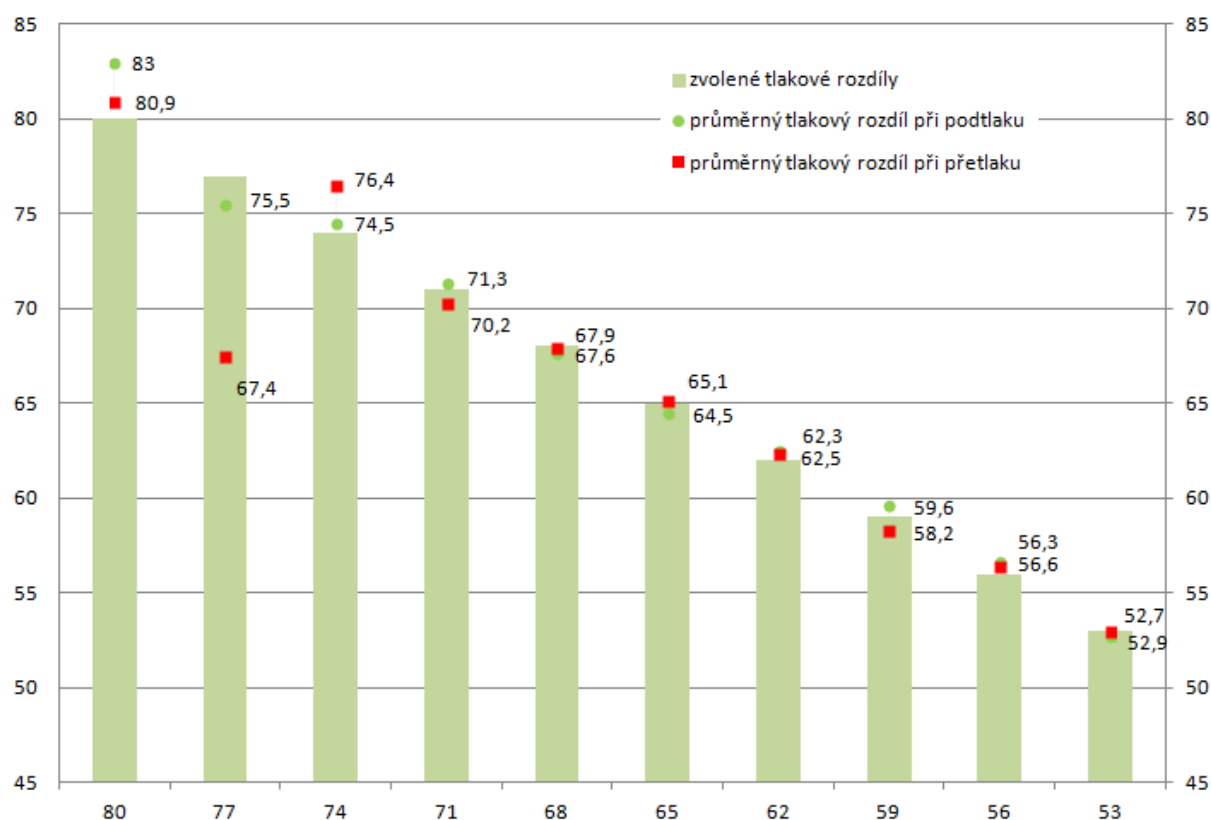
Obr. 43 Graf vyhodnocení průtoků vzduchu

Tab. 24 Tabulka rozdílů objemových průtoků

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [m ³ /h]	Přetlak [m ³ /h]	Rozdíl [m ³ /h]
1	32	390	454	64,00
2	29	372	419	47,00
3	26	347	381	34,00
4	23	323	342	19,00
5	20	286	321	35,00
6	17	263	276	13,00
7	14	227	236	9,00
8	11	197	207	10,00
9	8	161	164	3,00
10	5	121	121	0,00

Vysoké tlakové rozdíly

Při měření varianty 3, postačila po celou dobu měření clona B. Výsledná hodnota intenzity výměny vzduchu byla stejná, jako v případě měření se standardními tlakovými rozdíly.



Obr. 44 Vyhodnocení vysokých tlakových rozdílů 80-53 Pa

Tab. 25 Tlakové rozdíly s odchylkami naměřených hodnot

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [Pa]	odchylka %	Přetlak [Pa]	odchylka %
1	80	83	3,75	80,9	1,13
2	77	75,5	-1,95	67,4	-12,47
3	74	74,5	0,68	76,4	3,24
4	71	71,3	0,42	70,2	-1,13
5	68	67,6	-0,59	67,9	-0,15
6	65	64,5	-0,77	65,1	0,15
7	62	62,5	0,81	62,3	0,48
8	59	59,6	1,02	58,2	-1,36
9	56	56,6	1,07	56,3	0,54
10	53	52,7	-0,57	52,9	-0,19

Během měření varianty 3 se pravděpodobně projevila nedokonalost spojů vzduchotěsné vrstvy lepených bitumenovou páskou. Po spuštění měření za přetlaku byla odchylka průměru získaných dat při prvním záznamu tj. při tlakovém rozdílu 80 Pa pouze 1,1%. Při měření druhého bodu s přednastaveným tlakovým rozdílem 77 Pa došlo k výrazným výkyvům při záznamu dat. Výsledná odchylka vypočteného průměru je tak pro tento bod 12,5%. Je zřejmé, že v tomto bodě mohlo dojít k uvolnění některého z četných lepených spojů v parozábraně či k povolení nevhodně přelepeného prostupu kabelu touto vrstvou.

Protože se parotěsná fólie obvykle instaluje ze strany interiéru a veškeré spoje jsou rovněž prováděny z této strany, bývají během měření v režimu přetlaku přesahy a spoje fólie ještě více utěsněny přitlačením k podkladu vlivem zvýšeného tlaku v interiéru. Defekty se tak mohou projevit ve větší míře v místech napojení parotěsné vrstvy na okolní konstrukce v rozích a pravoúhlých napojeních, nebo právě v místě prostupu tzb.

Exponent proudění pro toto měření nabývá hodnoty $n=0,9$, což poukazuje na proudění vzduchu netěsností většího rozměru než v předchozích variantách.

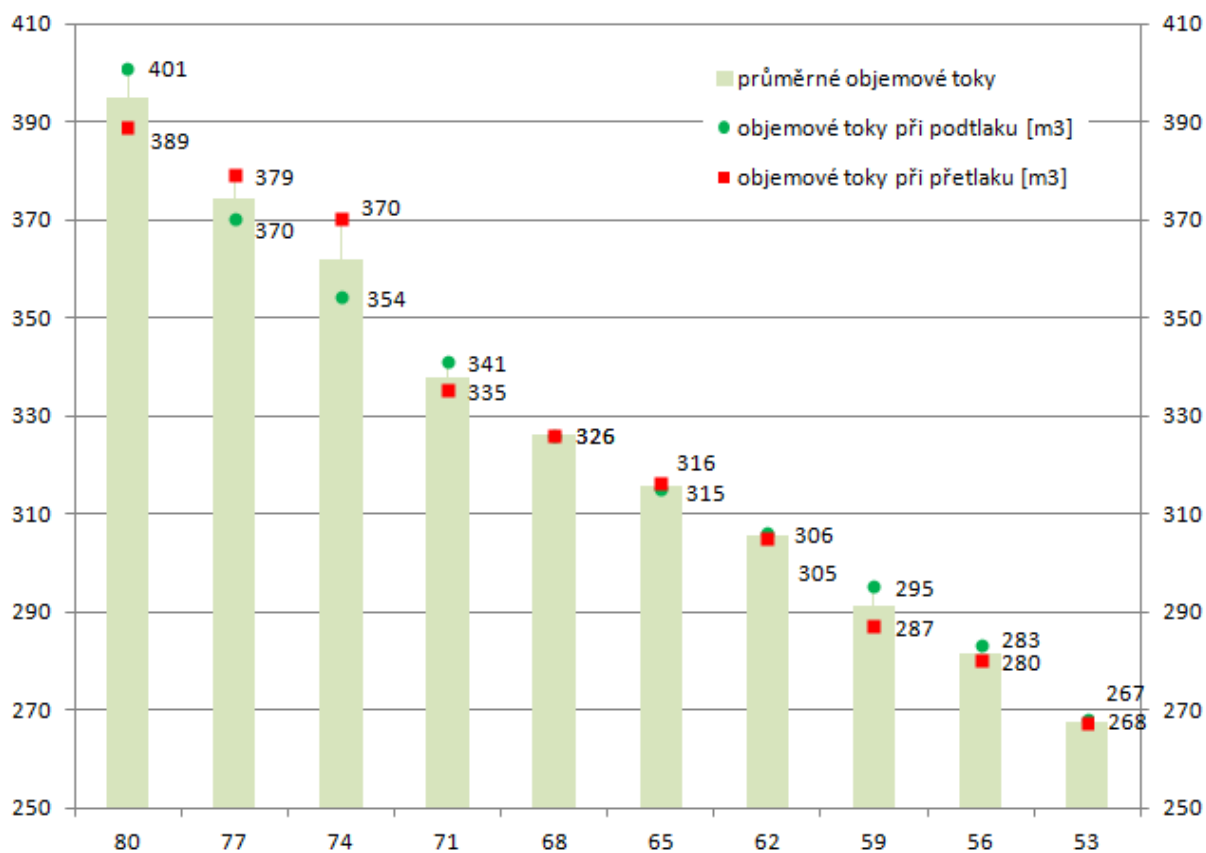
Zároveň je touto skutečností potvrzena domněnka o zvýšení projevů perforací parozábrany vlivem vyššího tlaku v interiéru. Ke vzniku zvětšujících se netěsností může docházet také v okolí sponek kotvicích parotěsnou fólii k nosné konstrukci, kde vlivem měnících se tlakových režimů (přetlaku a podtlaku) dochází k namáhání fólie a zvětšování perforace. Nejvhodnější je tedy volit vzduchotěsné OSB desky v celé ploše vzduchotěsné obálky budovy.

Vyhodnocení průtoků vzduchu

Při velkém tlakovém rozdílu došlo zřejmě k protržení některého z četných prostupů a tím k výraznějším výkyvům objemových průtoků v různých tlakových režimech. Při snížení tlakového rozdílu pod 74 Pa se rozdíly průtoků opět ustálily.

Tab. 26 Tabulka rozdílů průtoků vzduchu

Body	zvolené tlakové rozdíly	Podtlak [m ³ /h]	Přetlak [m ³ /h]	Rozdíl [m ³ /h]
1	80	401	389	12,00
2	77	370	379	9,00
3	74	354	370	16,00
4	71	341	335	6,00
5	68	326	326	0,00
6	65	315	316	1,00
7	62	306	305	1,00
8	59	295	287	8,00
9	56	283	280	3,00
10	53	268	267	1,00



Obr. 45 Graf vyhodnocení průtoků vzduchu

5.4.3 Shrnutí

Objekt reagoval na oba tlakové režimy shodně. Jen v případě měření za nízkých tlakových rozdílů jsou patrné mírně odlišné směrnice regresních přímk, z čehož vyplývá mírně odlišné chování vzduchotěsné vrstvy, odpovídající chování za běžných povětrnostních podmínek. Zaznamenávání dat pro tuto variantu probíhalo nejsnáze. V obou tlakových režimech došlo k ustálení měřených bodů s minimální odchylkou od přednastavených tlakových rozdílů.

Díky příznivým povětrnostním podmínkám a malým rozměrům testovaného prostoru nebylo udržení malých tlakových rozdílů obtížné, což urychlilo měření a zvýšilo přesnost výsledků.

Během všech variant měření bylo dosaženo výsledků s velmi malou odchylkou. Intenzita výměny vzduchu vycházela pro všechny varianty měření téměř shodně s hodnotou $n_{50} = 2,1 \text{ h}^{-1}$. Větších hodnot však bylo dosahováno u všech variant při přetlaku. Opět se zde potvrdilo, že za vhodných klimatických podmínek může být dosaženo stejných výsledků při měření s různými tlakovými diferencemi.

6. ZÁVĚRY

Pokud budou měření při nižších tlakových rozdílech prováděna za ideální povětrnostních podmínek, mohou být z takto získaných dat vypočteny výsledné hodnoty průvzdušnosti odpovídající tlakovým rozdílům, kterým bude s největší pravděpodobností stavba během celého roku vystavena.

Vezmeme-li v úvahu pouze rychlost větru, o které víme, že je ovlivněna mnoha faktory, jimiž jsou například členitost terénu, nadmořská výška, teplota atp., můžeme na základě hodnot průměrné roční rychlosti větru určit průměrný roční tlakový rozdíl působící na stavbu. Na většině území v České republice dosahuje průměrná roční rychlost větru hodnot $2 - 8 \text{ m.s}^{-1}$, což odpovídá přibližnému tlakovému rozdílu $8 - 26 \text{ Pa}$.

Proto by výsledné intenzity výměny vzduchu získané při měření za nižších tlakových rozdílů, mohly mít lepší vypovídající hodnotu než výsledky naměřené při současném standardu intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa . Podmínkou však je, aby měření probíhalo za úplného bezvětrí nebo při mírném větru za předpokladu manuálního ovládání ventilátoru prostřednictvím měřicího softwaru. Ohled je nutné brát také na hustotu okolní zástavby či vegetace. Při volbě tlakových rozdílů je dále nutné zahrnout vliv velikosti testovaného prostoru a konstrukčního systému budovy.

V následující tabulce jsou porovnány hodnoty naměřených intenzit výměny vzduchu n_{50} s navrženými hodnotami n_{30} získanými výpočtem včetně procentuálního vyjádření rozdílu obou hodnot. Je zde zřejmé, že rozdíly nejsou zanedbatelné.

Tab. 27 Rozdíly hodnot intenzit výměny vzduchu n_{50} a navržených n_{30}

	varianta 1			varianta 2			varianta 3		
	hodnota n_{50}	navržená hodnota n_{30}	rozdíl [%]	hodnota n_{50}	navržená hodnota n_{30}	rozdíl [%]	hodnota n_{50}	navržená hodnota n_{30}	rozdíl [%]
Učebna D205	1,44	0,98	32	1,41	0,99	30	1,44	1,02	29
Moravské Knínice	2,08	1,43	31	2,08	1,49	28	2,10	1,54	27
Popůvky	2,10	1,51	28	2,12	1,48	30	2,10	1,52	28
Dřevostavba	2,18	1,46	33	2,16	1,44	33	2,16	1,39	36

V praxi nastávají situace, kdy je nutné provést měření bez ohledu na nepříznivé klimatické podmínky. Data získávaná při měření s nízkými tlakovými rozdíly jsou v těchto situacích velmi zkreslená. Výsledné hodnoty neprůvzdušnosti potom nemusejí splňovat podmínky norem a stav obálky budovy je prohlášen za nevyhovující. Z tohoto důvodu se jako vhodnější

jeví měření prováděné podle současných pravidel ovšem s následným přepočtem na hodnotu n_i při nižším tlakovém rozdílu nebo vyhodnocením hodnoty n_{50} s určitými úlevami. V obou případech by bylo vhodné tyto nesrovnalosti legislativně ošetřit.

Měření probíhají v ojedinělých případech také s nedostatečnou technologickou pauzou, kdy těsnící tmely a jiné hmoty nestačily dostatečně vyschnout a nedosáhly tak požadovaných vlastností. Za případné nedostatky proto zodpovídá stavebník nebo realizační firma. Redukci výsledků ovlivněných tímto faktor pravděpodobně nemá smysl zahrnovat do legislativy. Navíc jsou pokyny a požadavky na přípravu stavby před měřením vzduchotěsnosti obvykle poskytnuty měřícím technikem v dostatečném předstihu.

Dalším faktorem ovlivňujícím výsledky je umístění ventilátoru v obvodovém plášti budovy. Při měření stejných objektů byly zaznamenány nezanedbatelné rozdíly vznikající vlivem osazení ventilátoru do různých (konstrukcí) výplní otvorů.

Měřicí zařízení bývá většinou osazováno do vstupních dveří objektu, avšak právě dveře v obvodovém plášti budov mohou být zdrojem výraznějších netěsností než samotná okna.

Je-li to v konkrétních případech možné, je vhodnější osadit ventilátor do jiného otvoru. Za vhodnější otvor lze, kromě oken, považovat například dveře oddělující obytnou část domu od garáže. Dopady případných netěsností těchto dveří nejsou tak významné vzhledem k občasnému vystavení externím podmínkám v době kdy je vjezd do garáže otevřen.

7. SEZNAM ZDROJŮ

- [1] ČSN 73 0540-2: 2011 Tepelná ochrana budov – Část 2 požadavky
- [2] ČSN EN 13 829 (2001) Thermal performance of buildings – Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method, Tepelné chování budov – Stanovení průvzdušnosti budov – Tlaková metoda
- [3] NOVÁK, Jiří. *Vzduchotěsnost obvodových plášťů budov*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2008, Stavitel. ISBN 978-80-247-1953-5
- [4] Vyhláška č. 268/2009 Sb., o technických požadavcích na stavby
- [5] HORÁČKOVÁ, Michaela. Vliv výpočtové hranice obálky vzduchotěsnosti budovy na celkovou hodnotu průvzdušnosti : diplomová práce. Brno, 2011. 97 s., 68 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce Ing. David Bečkovský, Ph.D..

Internet:

- [6] ŠKVOR, Petr. <http://www.precizni-drevostavby.cz> [online]. [cit. 17.12.2012]. Dostupný na WWW: http://www.precizni-drevostavby.cz/images/_phogalery/_middles/chyby-staveb-plisen-u-okna-DSCF1179.jpg
- [7] RUBINOVÁ, Olga. *Hodnocení a zvyšování kvality vzduchu* [online]. [cit. 5.12.2012]. Dostupný na WWW: <http://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubinova.o/prednasky/tp06.pdf>
- [8] ZWIENER, Viktor. DEKPROJEKT S.R.O.. *Odhalování netěsností v domech v pasivním a nízkoenergetickém standardu* [online]. 5.10.2009 [cit. 5.12.2012]. Dostupný na WWW: <http://stavba.tzb-info.cz/nizkoenergeticke-stavby/5952-odhalovani-netesnosti-v-domech-v-pasivnim-a-nizkoenergetickem-standardu>

8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Ozn.	Veličina	Jednotka
C_{env}	součinitel proudění	$m^3 \cdot h^{-1} \cdot Pa^{-n}$
i_{LV}	součinitel spárové průvzdušnosti	$m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot Pa^{-0,67}$
N	exponent proudění	
n_i	intenzita výměny vzduchu při tlakovém rozdílu i Pa	h^{-1}
n_{30}	navržená hodnota intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 30 Pa	h^{-1}
n_{50}	intenzita výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa	h^{-1}
$n_{50,N}$	doporučená hodnota celkové intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa	h^{-1}
n_{min}	nejnižší intenzita větrání místnosti	h^{-1}
$n_{min,N}$	nejnižší požadovaná intenzita větrání místnosti	h^{-1}
\tilde{V}_{env}	průtok vzduchu obálkou budovy	$m^3 \cdot h^{-1}$

Užité dolní indexy

Env	Obálka objektu
i	Tlakový rozdíl i Pa
LV	Spárová průvzdušnost
min	Minimální hodnota
N	Normová hodnota
30	Tlakový rozdíl 30 Pa
50	Tlakový rozdíl 50 Pa

9. SEZNAM PŘÍLOH:

A - Učebna D205

- Výstup z programu Tectite Express 3.6
- Vyhodnocení dat pro všechny varianty testů

B - Moravské Knínice

- Projektová dokumentace
- Výstup z programu Tectite Express 3.6
- Vyhodnocení dat pro všechny varianty testů

C - Popůvky

- Projektová dokumentace
- Výstup z programu Tectite Express 3.6
- Vyhodnocení dat pro všechny varianty testů

D - Experimentální dřevostavba

- Projektová dokumentace
- Výstup z programu Tectite Express 3.6
- Vyhodnocení dat pro všechny varianty testů

Výstup z měřícího zařízení Almemo

- Vyhodnocení dat
- Grafy

Veškeré přílohy se nacházejí v elektronické podobě na CD